

JULIANO BITENCOURT PADILHA

**ESTUDO E ANÁLISE DO GERADOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO, AUTÔNOMO E
AUTO-EXCITADO, ALIMENTANDO
CARGAS TRIFÁSICAS E
MONOFÁSICAS**

**FLORIANÓPOLIS
2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO E ANÁLISE DO GERADOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO, AUTÔNOMO E
AUTO-EXCITADO, ALIMENTANDO
CARGAS TRIFÁSICAS E
MONOFÁSICAS**

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

JULIANO BITENCOURT PADILHA

Florianópolis, Março de 2010

ESTUDO E ANÁLISE DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO, AUTÔNOMO E AUTO-EXCITADO, ALIMENTANDO CARGAS TRIFÁSICAS E MONOFÁSICAS

JULIANO BITENCOURT PADILHA

‘Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Orientador

Prof. Roberto de Souza Salgado, Dr.
Coordenador no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Patrick Kuo-Peng, Dr.
Orientador

Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Co-orientador

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Prof. Orlando Antunes, Dr.

Prof. Fredemar Rüncos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família. A meus pais que com imensa dedicação, carinho e amor foram e são a base para tudo de positivo que alcancei e alcançarei em minha vida. Saibam que amo vocês e ainda viveremos muitos momentos felizes juntos. Pai, obrigado pelo senhor sempre estar incentivando-me a alcançar meus objetivos, e mãe, ainda serei um doutor! A meu irmão pelo companheirismo e amizade.

A meu orientador, Prof. Patrick Kuo-Peng, por todo o apoio e acompanhamento durante o desenvolvimento deste trabalho. Igualmente, a meu co-orientador, Prof. Nelson Sadowski.

Aos demais professores do GRUCAD: Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Prof. Renato Carlson, Prof. Walter Pereira Carpes Junior, Prof. Mauricio Valência Ferreira da Luz e Prof. Nelson Jhoe Batistela, por todo o conhecimento transmitido durante o mestrado, tanto em sala de aula quanto fora (durante as conversas do dia-a-dia), sempre dispostos e cordiais comigo.

Também agradeço a todos os colegas do GRUCAD, principalmente aqueles na qual possuí um maior laço de amizade.

Ao Brasil e a sociedade brasileira por possibilitar que eu percorresse toda minha trajetória estudantil em escolas e instituições públicas.

Ao professor Luiz Antônio Righi, uma pessoa que admiro muito. Por todo incentivo e apoio recebido quando decidi tentar uma vaga para ingressar no GRUCAD.

A todos os professores que tive durante minha vida, desde o primeiro, quando entrei para pré-escola, até os últimos. Todos de alguma forma contribuíram para minha formação.

Por fim, agradeço de forma geral, a todas aquelas pessoas que contribuíram de forma voluntária ou involuntária para que este trabalho fosse realizado. E ele só foi possível de ser realizado depois de uma longa jornada de vinte e quatro anos que me permitiu chegar até aqui.

O universo não foi feito a medida do ser humano, mas tampouco lhe é
adverso: é-lhe indiferente.

CARL SAGAN

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau Mestre em Engenharia Elétrica.

ESTUDO E ANÁLISE DO GERADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO, AUTÔNOMO E AUTO-EXCITADO, ALIMENTANDO CARGAS TRIFÁSICAS E MONOFÁSICAS

Juliano Bitencourt Padilha

Março/2010

Orientador: Patrick Kuo-Peng, Dr.

Co-orientador: Nelson Sadowski, Dr.

Área de Concentração: Análise e Concepção de Dispositivos Eletromagnéticos

Palavras-chave: gerador de indução, auto-excitado, autônomo, cargas trifásicas e monofásicas.

Número de Páginas: 87

O presente trabalho apresenta um estudo e análise do gerador de indução trifásico, autônomo e auto-excitado, alimentando cargas trifásicas e monofásicas. O gerador de indução é modelado através de circuitos equivalentes, baseados nos parâmetros da máquina. Para diferentes configurações do sistema composto pelo gerador, banco de capacitores e carga é possível equacionar um sistema linear de equações diferenciais e resolvê-lo a partir de um método numérico, sendo utilizado neste trabalho o método Runge-Kutta de 4ª ordem. Considerou-se o efeito de saturação da máquina no estudo do sistema. Desta forma, um programa é implementado no *software* MATLAB de forma a solucionar os sistemas lineares obtidos e assim analisar variáveis como correntes e tensões para as diferentes configurações analisadas e para diferentes valores de capacitores, impedância de carga e velocidade imposta ao eixo do gerador. Os parâmetros referentes ao gerador analisado são os mesmos apresentados em determinada referência bibliográfica, assim pôde-se validar previamente o programa elaborado, comparando os resultados obtidos através das simulações com os resultados apresentados pela referência e com os resultados obtidos através de simulações no pacote SIMULINK, presente no *software* MATLAB.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

**STUDY AND ANALYSIS OF THREE-PHASE
INDUCTION GENERATOR, AUTONOMOUS
AND SELF-EXCITED, FEEDING SINGLE
AND THREE-PHASE LOADS**

Juliano Bitencourt Padilha

March/2010

Advisor: Patrick Kuo-Peng, Dr.

Co-advisor: Nelson Sadowski, Dr.

Area of Concentration: Conception and Analysis of Electromagnetic Devices

Keywords: induction generator, self-excited, autonomous, single and three-phase loads.

Number of Pages: 87

This paper presents a study and analysis of three-phase induction generator, autonomous and self-excited, feeding single and three-phase loads. The induction generator is modeled by equivalent circuits, based on the parameters of the machine. For different configurations composed by the generator, capacitor bank and load it is possible to write a linear system of differential equations and solve it by means of a numerical method. In this study fourth order Runge-Kutta method is used. The effect saturation of the machine is also considered. A program is implemented in MATLAB software in order to solve the linear systems obtained and therefore to analyze variables such as currents and voltages for the different configurations studied and for different values of capacitors, load impedance and speed imposed on the generator shaft. The generator parameters are the same presented in given bibliographic reference, so it is possible to validate the program developed, comparing the results obtained through simulations not only with the results presented by the reference but also with the results obtained through simulations in SIMULINK package, wich is an extension of MATLAB software.

SIGLAS E ABREVIATURAS

GI	Gerador de indução;
GIAE	Gerador de indução auto-excitado;
GITAE	Gerador de indução trifásico auto-excitado;
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier);
FP	Fator de potência;

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$\lambda'_{qr}, \lambda'_{dr}, \lambda'_{0r}$	Enlaces de fluxo de sequência em quadratura, direta e zero, respectivamente, concatenados no rotor do GI, referidos ao estator;	[Wb]
$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}, \lambda_{0s}$	Enlaces de fluxo de sequência em quadratura, direta e zero, respectivamente, concatenados no estator do GI;	[Wb]
η	Rendimento;	[%]
ω	Velocidade angular assumida para as variáveis do sistema $dq0$;	[rad/s]
ω_r	Velocidade angular elétrica do rotor do GI;	[rad/s]
ω_{rotor}	Velocidade angular mecânica do rotor do GI;	[rad/s]
C	Capacitância do capacitor utilizado nas configurações monofásicas.	[F]
C_a, C_b, C_c	Capacitância dos capacitores do banco de capacitores, respectivamente, das fases A, B e C ;	[F]
$C_{mín}$	Capacitância mínima requerida para a auto-excitação do GIAE;	[F]
E_0	Tensão eficaz de fase no ramo magnetizante do GI;	[V]
\vec{E}_0	Fasor referente à tensão eficaz de fase no ramo magnetizante do GI;	[V]

f	Frequência das variáveis elétricas (tensões e correntes) referentes ao estator do GI;	[Hz]
f_b	Frequência de base;	[Hz]
I_0 (ou I_{efs})	Corrente eficaz de fase no estator do GI;	[A]
\vec{I}_0	Fasor referente à corrente eficaz de fase no estator do GI;	[A]
I_{as}, I_{bs}, I_{cs}	Correntes eficazes de fase no estator do GI, respectivamente, nas fases A , B e C ;	[A]
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	Correntes de fase no estator do GI, respectivamente, nas fases A , B e C ;	[A]
I_C	Corrente eficaz no capacitor referente às configurações monofásicas;	[A]
i_C	Corrente(s) no(s) capacitor(es) do banco de capacitores;	[A]
i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc}	Correntes de fase no banco de capacitores, respectivamente, nas fases A , B e C ;	[A]
I_{efC}	Corrente eficaz de fase nos capacitores do banco de capacitores;	[A]
I_{efZ}	Corrente eficaz de fase na carga;	[A]
I_f	Corrente eficaz que atravessa a resistência associada às perdas no material ferromagnético do GI;	[A]
\vec{I}_f	Fasor referente à corrente eficaz que atravessa a resistência associada às perdas no material ferromagnético do GI;	[A]

I_m	Corrente eficaz de magnetização do GI;	[A]
\vec{I}_m	Fasor referente à corrente eficaz de magnetização do GI;	[A]
I_{m0}	Corrente de magnetização eficaz do GI no limite da região linear;	[A]
$i'_{qr}, i'_{dr}, i'_{0r}$	Correntes de sequência em quadratura, direta e zero, respectivamente, no rotor do GI, referidas ao estator;	[A]
i_{qs}, i_{ds}, i_{0s}	Correntes de sequência em quadratura, direta e zero, respectivamente, no estator do GI;	[A]
i_s	Corrente(s) de fase no estator do GI;	[A]
I_Z	Corrente eficaz na carga referente às configurações monofásicas;	[A]
i_Z	Corrente(s) de fase na carga (ou corrente na carga monofásica);	[A]
i_{za}, i_{zb}, i_{zc}	Correntes de fase nas cargas, respectivamente, nas fases A, B e C;	[A]
i_{zq}, i_{zd}, i_{z0}	Correntes na carga, respectivamente, nos eixos d, q e 0;	[A]
J	Inércia do rotor do GI;	[N·m ²]
k_a	Por unidade de frequência;	
k_b	Por unidade de velocidade;	
L	Indutância de carga por fase;	[H]
L_a, L_b, L_c	Indutâncias de carga, respectivamente, nas fases A, B e C;	[H]

L'_{lr}	Indutância de dispersão por fase do rotor do GI, referida ao estator;	[H]
L_{ls}	Indutância de dispersão por fase do estator do GI;	[H]
M	Indutância de magnetização mútua entre estator e rotor do GI;	[H]
M_l	Indutância de magnetização mútua entre estator e rotor do GI na região linear (valor constante);	[H]
M_s	Indutância de magnetização mútua entre estator e rotor do GI na região não-linear (valor variável);	[H]
P	Número de pólos do GI;	
P_0	Potência por fase do GI;	[W]
P_{bl}	Potência trifásica medida no ensaio com rotor bloqueado da máquina de indução;	[W]
P_{cobre}	Perdas no cobre (por efeito Joule) do GI associada ao estator e ao rotor;	[W]
P_{ent}	Potência de entrada do GI;	[W]
P_{ent_m}	Potência de entrada média do GI;	[W]
P_{ferro}	Perdas ferromagnéticas por fase no GI;	[W]
P_{rot}	Perdas rotacionais por fase no GI;	[W]
$P_{saída}$	Potência de saída do GI;	[W]
$P_{saída_m}$	Potência de saída média do GI;	[W]
R	Resistência de carga por fase;	[Ω]
R_a, R_b, R_c	Resistências de carga, respectivamente, nas fases A, B e C;	[Ω]

R_{bl}	Resistência por fase da máquina de indução, referente ao ensaio com rotor bloqueado;	[Ω]
R_f	Resistência associada às perdas no material ferromagnético do GI.	[Ω]
r_r'	Resistência por fase do rotor do GI, referida ao estator;	[Ω]
r_s	Resistência por fase do estator do GI;	[Ω]
t	Tempo;	[s]
T_e	Torque eletromagnético do GI;	[N·m]
T_{e_m}	Torque eletromagnético médio do GI;	[N·m]
T_L	Torque de carga;	[N·m]
V_0 (ou V_{eff})	Tensão eficaz de fase no estator do GI;	[V]
\vec{V}_0	Fasor referente à tensão eficaz de fase no estator do GI;	[V]
V_{ab}, V_{ac}, V_{cd}	Tensões eficazes entre os nós a e b , a e c e c e d , respectivamente (ver Figura 5.1);	[V]
v_{an}, v_{bn}, v_{cn}	Tensões entre as fases A , B e C e o ponto N , respectivamente;	[V]
v_{as}, v_{bs}, v_{cs}	Tensões de fase no estator do GI, respectivamente, nas fases A , B e C ;	[V]
V_C	Tensão eficaz no capacitor referente às configurações monofásicas;	[V]
v_C	Tensão(ões) de fase no(s) capacitor(es) do banco de capacitores;	[V]

v_{Ca}, v_{Cb}, v_{Cc}	Tensões de fase nos capacitores do banco de capacitores, respectivamente, nas fases A, B e C ;	[V]
$V_{efZa}, V_{efZb}, V_{efZc}$	Tensões eficazes de fase, respectivamente nas cargas Z_a, Z_b e Z_c ;	[V]
$v'_{qr}, v'_{dr}, v'_{0r}$	Tensões de sequência em quadratura, direta e zero, respectivamente, no rotor do GI, referidas ao estator;	[V]
v_{qs}, v_{ds}, v_{0s}	Tensões de sequência em quadratura, direta e zero, respectivamente, no estator do GI;	[V]
v_s	Tensão(ões) de fase no estator do GI;	[V]
V_t	Tensão eficaz nos terminais da carga monofásica;	[V]
v_z	Tensão(ões) de fase no(s) terminal(ais) da carga (ou tensão na carga monofásica);	[V]
v_{Za}, v_{Zb}, v_{Zc}	Tensões de fase na carga trifásica, respectivamente, nas fases A, B e C ;	[V]
X_C	Reatância capacitiva por fase;	[Ω]
X_L	Reatância indutiva de carga por fase;	[Ω]
X_{ls}	Reatância de dispersão por fase do estator do GI;	[Ω]
X'_{lr}	Reatância de dispersão por fase do rotor, referida ao estator do GI;	[Ω]
X_m	Reatância de magnetização mútua entre estator e rotor do GI;	[Ω]
X_{mi}	Reatância de magnetização não-saturada mútua entre estator e rotor do GI (valor constante);	[Ω]

Z_a, Z_b, Z_c	Impedâncias das cargas acopladas ao GI, respectivamente, nas fases A , B e C ;	$[\Omega]$
Z_{ab}	Impedância entre os nós a e b (ver Figura 5.1);	$[\Omega]$
Z_{ac}	Impedância entre os nós a e c (ver Figura 5.1);	$[\Omega]$
Z_{ad}	Impedância entre os nós a e d (ver Figura 5.4);	$[\Omega]$
Z_b	Impedância de base;	$[\Omega]$
Z_{bl}	Impedância por fase da máquina de indução, referente ao ensaio com rotor bloqueado;	$[\Omega]$
Z_c	Impedância de carga por fase;	$[\Omega]$
Z_{cd}	Impedância entre os nós c e d (ver Figura 5.1);	$[\Omega]$
Z_L	Impedância de carga referente a uma configuração monofásica;	$[\Omega]$
Y_{ad}	Admitância entre os nós a e d , do <i>loop</i> acd (ver Figuras 5.1 e 5.4);	$[\Omega^{-1}]$
Y_c	Admitância capacitiva por fase;	$[\Omega^{-1}]$
Y_L	Admitância de carga por fase;	$[\Omega^{-1}]$

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Circuitos equivalentes segundo a transformação de Park para um GI trifásico, simétrico, com rotor curto-circuitado [21].	10
Figura 3.1 – Circuito equivalente simplificado, por fase, da máquina de indução, considerando o ensaio em vazio [22].	14
Figura 3.2 – A extrapolação da curva “potência de entrada <i>versus</i> tensão” permite encontrar o valor das perdas rotacionais, P_{rot}	15
Figura 3.3 – M em função de I_m (aproximação por um polinômio de grau 6)	18
Figura 3.4 – Circuito equivalente simplificado, por fase, da máquina de indução, considerando o ensaio com rotor bloqueado.	19
Figura 4.1 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 4 fios).	21
Figura 4.2 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 3 fios).	25
Figura 4.3 – GI com carga e banco de capacitores conectados em delta.	31
Figura 5.1 – Circuito equivalente, por fase, do GITAE.	36
Figura 5.2 – Simplificação do circuito apresentado pela Figura 5.1.	37
Figura 5.3 – Configurações monofásicas; (a) gerador ligado em estrela; (b) gerador ligado em delta	40
Figura 5.4 – Circuito equivalente considerando configurações monofásicas.	40
Figura 6.1 – Fluxograma referente ao programa elaborado.	43
Figura 6.2 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 3 fios).	46

Figura 6.3 – Tensões no estator do GI, em regime permanente, em função do tempo. Em vermelho, resultado simulado; em azul e tracejado, resultado experimental [25].	46
Figura 6.4 – Tensões no estator do GI, em regime permanente, em função do tempo (resultado obtido através do programa elaborado). Em azul, v_{as} ; em vermelho, v_{bs} ; em verde, v_{cs} .	47
Figura 6.5 – Correntes na carga, em regime permanente, em função do tempo. Em vermelho, resultado simulado; em azul e tracejado, resultado experimental [25].	47
Figura 6.6 – Correntes na carga, em regime permanente, em função do tempo (resultado obtido através do programa elaborado). Em azul, i_{as} ; em vermelho, i_{bs} ; em verde, i_{cs} .	48
Figura 6.7 – Evolução da tensão v_{as} ao longo do processo de auto-excitação (resultado obtido através do programa elaborado).	49
Figura 6.8 – Evolução da tensão v_{as} ao longo do processo de auto-excitação (resultado obtido através do SIMULINK).	50
Figura 6.9 – Perda da excitação do GI quando os capacitores decaem para um valor abaixo do valor mínimo requerido.	50
Figura 6.10 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_C , e na carga trifásica, v_Z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc} .	51
Figura 6.11 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_C , e na carga trifásica, i_Z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{Ca} e i_{Za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{Cb} e i_{Zb} ; em verde, i_{sc} , i_{Cc} e i_{Zc} .	52
Figura 6.12 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e $P_{saída}$ em função do t .	53
Figura 6.13 – V_{eff} em função da resistência de carga por fase para diferentes velocidades impostas ao GI, com $C_a=C_b=C_c=110\ \mu\text{F}$.	54
Figura 6.14 – V_{eff} em função da resistência de carga por fase para diferentes velocidades impostas ao GI, com $C_a=C_b=C_c=100\ \mu\text{F}$.	54

Figura 6.15 – C_{min} em função de Z_c para cargas com diferentes FP (impedância de base: $Z_b = 16,8 \Omega$).....	55
Figura 6.16 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_C , e na carga trifásica, v_Z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc}	56
Figura 6.17 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_C , e na carga trifásica, i_Z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{Ca} e i_{Za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{Cb} e i_{Zb} ; em verde, i_{sc} , i_{Cc} e i_{Zc}	56
Figura 6.18 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e $P_{saída}$ em função do t	57
Figura 6.19 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_C , e na carga trifásica, v_Z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc}	60
Figura 6.20 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_C , e na carga trifásica, i_Z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{Ca} e i_{Za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{Cb} e i_{Zb} ; em verde, i_{sc} , i_{Cc} e i_{Zc}	61
Figura 6.21 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e $P_{saída}$ em função do t	61
Figura 6.22 – Sinal resultante da equação (6.5).	63
Figura 6.23 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 4 fios).....	64
Figura 6.24 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_C , e na carga trifásica, v_Z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc}	64
Figura 6.25 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_C , e na carga trifásica, i_Z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{Ca} e i_{Za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{Cb} e i_{Zb} ; em verde, i_{sc} , i_{Cc} e i_{Zc}	65
Figura 6.26 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e $P_{saída}$ em função do t	66
Figura 6.27 – GI com carga e banco de capacitores conectados em delta.	66

Figura 6.28 – Configurações monofásicas: (a) GI conectado em delta; (b) GI conectado em estrela.	68
Figura 6.29 – C_{\min} em função de Z_c para cargas com diferentes FP, considerando o GI conectado em delta (impedância de base: $Z_b = 16,8 \Omega$).	69
Figura 6.30 – C_{\min} em função de Z_c para cargas com diferentes FP, considerando o GI conectado em estrela (impedância de base: $Z_b = 16,8 \Omega$).	69
Figura 6.31 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_Z e i_Z , considerando o GI conectado em delta.	70
Figura 6.32 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s . Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc}	70
Figura 6.33 – Perda da excitação do GI quando o capacitor decai para um valor abaixo do valor mínimo requerido.	71
Figura 6.34 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_Z e i_Z , considerando o GI conectado em estrela.	71
Figura 6.35 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s . Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} e i_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc}	72
Figura 6.36 – Configurações monofásicas: (a) Steinmetz I; (b) Steinmetz II.	73
Figura 6.37 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_Z e i_Z , considerando a configuração Steinmetz I.	74
Figura 6.38 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s , considerando a configuração Steinmetz I. Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} e i_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc}	74
Figura 6.39 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_Z e i_Z , considerando a configuração Steinmetz II.	75
Figura 6.40 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s , considerando a configuração Steinmetz II. Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} e i_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc}	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores assumidos para k_x de acordo com a categoria da máquina de indução [23].	20
Tabela 6.1 – Resultados obtidos para o GI conectado em estrela com 3 fios.....	58
Tabela 6.2 – Resultados obtidos para as diferentes configurações estudadas, considerando uma carga RL desequilibrada	67
Tabela 6.3 – Resultados obtidos para as duas configurações monofásicas ilustradas pela Figura 6.28	72
Tabela 6.4 – Resultados obtidos para as duas configurações monofásicas do tipo Steinmetz.....	76

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Revisão bibliográfica.....	2
1.1.1 Análise geral do gerador de indução trifásico auto-excitado.....	2
1.1.2 Análise do GITAE alimentando cargas monofásicas.....	5
1.1.3 Determinação da capacitância requerida para a auto-excitação.	6
1.2 Objetivos gerais	8
1.3 Objetivos específicos	8
1.4 Organização da dissertação.....	9

CAPÍTULO 2 MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO

2.1 Representação do GI a partir de circuitos equivalentes.....	10
2.2 Equacionamento dos circuitos equivalentes	11
2.2.1 Equações referentes ao modelo do gerador.....	11
2.3 Torque eletromagnético.....	12
2.4 Potências de entrada e de saída	13

CAPÍTULO 3 MODELAGEM DA SATURAÇÃO

3.1 Ensaio em vazio	14
3.2 Modelagem de M em função de I_m.....	17
3.1 Ensaio com rotor bloqueado	14

CAPÍTULO 4 EQUAÇÕES REFERENTES AO BANCO DE CAPACITORES E A CARGA

4.1 GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela	21
4.1.1 Terminais do gerador com 4 fios	21
4.1.2 Terminais do gerador com 3 fios	26
4.2 GI com carga e banco de capacitores conectados em delta	30

CAPÍTULO 5

CAPACITÂNCIA MÍNIMA REQUERIDA PARA A AUTO-EXCITAÇÃO

5.1 O Processo de auto-excitação	35
5.2 Capacitância mínima requerida.....	35
5.2.1 Considerando uma configuração trifásica equilibrada	35
5.2.2 Considerando uma configuração monofásica	39

CAPÍTULO 6

RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Programa elaborado	45
6.2 GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (gerador com 3 fios).....	45
6.2.1 Carga resistiva, trifásica e equilibrada	48
6.2.2 Carga RL, trifásica e equilibrada	55
6.2.3 Carga RL, trifásica e desequilibrada	59
6.3 GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (gerador com 4 fios).....	63
6.4 GI com carga e banco de capacitores conectados em delta	66
6.5 Configurações monofásicas	68
6.5.1 Configurações do tipo Steinmetz	73

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 Conclusões gerais.....	77
7.2 Propostas de continuidade.....	78
ANEXO A1	80
ANEXO A2	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

A utilização do gerador de indução (GI), em substituição aos geradores de corrente contínua e síncrono, tem se mostrado uma solução interessante para o fornecimento de energia elétrica em áreas remotas, nas quais por razões econômicas, o fornecimento através de uma rede de distribuição não é uma boa opção.

Em determinados casos é conveniente o emprego do GI nestas áreas, sendo o mesmo associado a sistemas não-convencionais de energia elétrica, tais como, geração eólica e hidráulica de pequeno porte.

Nestes sistemas isolados é comum o uso de geradores de indução do tipo gaiola com excitação por capacitores, conhecidos como geradores de indução auto-excitados (GIAE) [1].

É importante destacar que o GI é simplesmente uma máquina de indução (comumente utilizada como motor), não apresentando nenhuma particularidade diferente na forma física.

De modo geral, o GI pode operar de duas formas distintas: com velocidade constante ou variável. Ainda, o mesmo pode ser ou não conectado diretamente à rede elétrica.

Há inúmeras vantagens em se utilizar geradores desta natureza quando comparados aos geradores de corrente contínua e síncronos, dentre as quais se pode citar: custo e tamanho reduzidos, robustez, ausência de escovas, ausência de fonte de corrente contínua para excitação, facilidade de manutenção, auto-proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos, boa resposta dinâmica e capacidade de gerar energia em velocidade variável [2].

Também apresentam algumas desvantagens, como o consumo de energia reativa (e o consequente baixo fator de potência) e a pequena regulação de tensão e de frequência possibilitada nos seus terminais [2]. No entanto, tais desvantagens estão sendo minimizadas ao longo dos anos a partir do desenvolvimento de conversores de energia estáticos, bem como pelo estudo de metodologias a serem adotadas quando do uso destas máquinas.

Em pequenos sistemas rurais é possível observar o fornecimento de energia elétrica a cargas monofásicas. Embora motores de indução monofásicos possam ser usados para a geração de energia, não apresentam neste caso o melhor desempenho, uma vez que são otimizados para

o fornecimento de energia mecânica e para baixas potências (dificilmente maiores que 3 kW) [1].

Para suprir essa deficiência é preferível usar máquinas de indução trifásicas, que são disponíveis em uma vasta faixa de potência e podem operar como geradores para suprir cargas monofásicas, necessitando somente de um único capacitor para que ocorra o processo de auto-excitação (pode-se ainda usar, neste caso, um banco de capacitores).

1.1 Revisão bibliográfica

A breve revisão bibliográfica aqui apresentada serviu-se basicamente de pesquisas em artigos publicados em diversas sociedades e entidades, tais como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*). Estas referências compreendem como principais áreas: máquinas elétricas, sistemas de geração de energia alternativa e análise e modelagem de sistemas baseados no GI.

1.1.1 Análise geral do gerador de indução trifásico auto-excitado

WANG et al. [3] descrevem o desempenho em regime transitório de um gerador de indução trifásico auto-excitado (GITAE) autônomo, sob excitações desbalanceadas (acoplamentos e desacoplamentos de capacitores do banco trifásico). Uma metodologia baseada no modelo do GI trifásico é empregada para se obter as equações dinâmicas referentes a um GITAE sob condições desbalanceadas. Tanto o gerador quanto o banco de capacitores são conectados em estrela com o ponto central (neutro) interligados entre eles. Resultados experimentais são obtidos para uma máquina de indução de 1,1 kW acionada por um motor de corrente contínua (máquina primária) para confirmar a validade do método proposto.

JAIN et al. [4] analisam o desempenho do GITAE perante alguns desbalanceamentos. Considera-se no estudo apresentado tanto os terminais da máquina, quanto o banco de capacitores e a carga conectados em delta. Adotou-se no estudo o modelo dq considerando um sistema de referência estacionário em relação ao estator. Destacam que este modelo permite analisar configurações de carga e de capacitores desbalanceados. O comportamento do GIAE foi investigado considerando o efeito

da saturação. Os desbalanceamentos estudados foram curto-circuitos, abertura (ou desconexão) de capacitores do banco de capacitores e abertura (ou desconexão) de impedâncias de carga. Os resultados simulados são comparados com resultados experimentais e a proximidade entre ambos torna válido o modelo desenvolvido.

MURTHY et al. [5] apresentam uma análise em regime permanente de um GITAE alimentado cargas do tipo trifásica desequilibrada e monofásicas. A teoria de componentes simétricas é utilizada para obter as equações matemáticas relevantes. Enquanto a análise do sistema é inerentemente complicada, devido ao desequilíbrio e a saturação magnética, simplificações incorporadas no circuito equivalente resultam em equações mais adequadas (simples) para simulação computacional. Apropriados parâmetros não-lineares são escolhidos correspondendo a níveis de saturação. Usando esta técnica, uma máquina de indução de 7,5 kW, 415/240 V, quatro pólos, operando como um GIAE e ligada em delta, é analisada alimentando diferentes cargas desequilibradas. Por fim, resultados simulados são comparados com experimentais.

DJAMILA et al [6] descrevem um modelo para simulação do GIAE. Tal modelo é obtido pela aplicação da transformação de Park e permite, quando adotando algumas hipóteses simplificativas, levar em consideração o efeito da saturação. Desta forma, a indutância de magnetização é modelada por um polinômio de grau 12 que é função da corrente de magnetização. A simulação computacional foi realizada fazendo uso do pacote SIMULINK, presente no *software* MATLAB. O trabalho também apresenta análises do transiente do GIAE. A fim de simular o processo de auto-excitação e o comportamento dinâmico do GI, é estabelecido primeiramente o modelo da máquina baseado nos eixos dq considerando o efeito da saturação. Posteriormente, os efeitos dos capacitores de excitação e cargas desequilibradas são investigados. As simulações e resultados práticos obtidos fazem referência a uma máquina de indução de 5,5 kW, conectada em estrela (assim como o banco de capacitores e a carga trifásica) e operando com velocidade constante.

NESBA et al. [2] analisam o desempenho dinâmico de um GITAE durante a ligação repentina de cargas estáticas. O modelo de fluxo dinâmico do GIAE nos eixos dq com referencial estacionário em relação ao estator é apresentado. O efeito da saturação é considerado. Os casos de carga puramente resistiva, indutiva e capacitiva são amplamente discutidos. Modelos para esses tipos de carga nos eixos dq com refe-

rencial estacionário em relação ao estator também são apresentados. Por fim, a análise apresentada é validada experimentalmente.

ELHAFYANI et al. [7] apresentam um estudo analisando os regimes permanente e transitório do GITAE. Em ambos os casos, com carga trifásica equilibrada e em vazio, a evolução da tensão de saída para diferentes valores de capacitância dos capacitores de excitação e para diferentes velocidades impostas ao GI é apresentada. Também é analisada a influência dos capacitores e dos valores de velocidade impostas ao eixo do gerador. Uma comparação entre resultados experimentais e simulados é apresentada.

GRANTHAM et al. [8] analisam o GITAE a partir da sua indutância de magnetização. Destacam que o valor da indutância de magnetização deve apresentar um valor abaixo do valor não-saturado na tensão terminal eficaz do gerador, fator essencial para que ocorra a auto-excitação. Apresentam o efeito da indutância de magnetização sobre a auto-excitação e descrevem o comportamento do gerador isolado sob carga. Também descrevem como a frequência de operação e a tensão gerada são afetadas pela mudança do valor de velocidade imposta ao gerador. Destacam que em sistemas de geração eólica a força do vento não é controlável, mas o sistema pode ser configurado para operar dentro de uma determinada faixa de velocidade. Resultados experimentais e simulados são apresentados e comparados.

WANG et al. [9] analisam o desempenho do GITAE isolado, sob condições de desequilíbrio de carga. Tanto o gerador quanto o banco de capacitores e a carga são conectados em estrela. Uma abordagem baseada no modelo trifásico da máquina de indução é empregada para obter as equações dinâmicas do GITAE. Características de regime permanente, tais como, fator de desequilíbrio de tensão, fator de desequilíbrio de corrente e eficiência do GITAE são examinadas e comparadas para três diferentes cargas passivas. Resultados experimentais confirmam a viabilidade da abordagem proposta.

CHATURVEDI et al [10] abordam a análise em regime permanente de um GITAE, conectado em delta, alimentando uma carga trifásica desequilibrada, ou ainda, sob excitação desequilibrada. O modelo utilizado para análise do GI baseia-se em componentes simétricas. Descrevem que a metodologia proposta é eficiente, a fim de estimar o rendimento dos geradores, bem como as condições de funcionamento. Não apresentam resultados experimentais.

1.1.2 Análise do GITAE alimentando cargas monofásicas

AL-BAHRANI et al [11] apresentam um estudo analisando o GITAE com um único capacitor, alimentando uma carga monofásica. É apresentada uma metodologia de cálculo para a determinação de algumas variáveis. Por exemplo, se o interesse é encontrar o ponto de operação do GI, a velocidade imposta à máquina e a reatância capacitiva do capacitor devem ser especificadas de modo a se obter analiticamente o valor da indutância de magnetização da máquina e a frequência das tensões no estator. De outro modo, se o interesse é encontrar o valor da reatância capacitiva e da frequência, os valores da velocidade e da indutância de magnetização devem ser fixados. Para calcular a mínima capacitância necessária para que ocorra o processo de auto-excitação, por exemplo, fixa-se um valor para a velocidade e fixa-se o valor da indutância de magnetização como sendo igual ao valor não-saturado da mesma. É também analisado o valor da tensão terminal no gerador em função do valor da indutância de magnetização, considerando o gerador operando em vazio. Tanto a conexão em estrela quanto a delta são analisadas no trabalho.

FUKAMI et al. [12] apresentam um estudo referente ao GITAE, conectado em estrela, alimentando uma carga monofásica. Embora a carga fosse monofásica, a configuração apresentada no artigo apresenta três capacitores. O estudo apresenta uma análise em regime permanente e são determinadas analiticamente grandezas tais como: frequência das variáveis referente ao estator, reatância de magnetização, tensão nos terminais do GI e potência de saída. O procedimento analítico apresentado para a análise do desempenho em regime permanente do gerador é validado através das comparações entre resultados analíticos e experimentais.

SHILPAKAR et al. [13] investigam o comportamento transitório do GITAE sendo utilizado em sistema de geração monofásico (em outras palavras, alimentando uma carga monofásica). O modelo dinâmico de uma configuração assimétrica de excitação (ou seja, não há a presença de um banco trifásico equilibrado acoplado aos terminais do gerador) é desenvolvido baseado no modelo dq considerando um sistema de referência estacionário em relação ao estator. O efeito da indutância de magnetização é também incorporado ao modelo. Resultados de simulações e experimentais são comparados para condições dinâmicas, tais como, perturbações de carga e curto-circuitos. A viabilidade da aplica-

ção do GITAE alimentando cargas monofásicas também é discutida.

CHAN [1] analisa o desempenho de um GITAE por um único capacitor, alimentando uma carga monofásica. Componentes simétricas são utilizadas para determinar a impedância de entrada do gerador, enquanto o método de Hooke e Jeeves (descrito em [1]) é utilizado para determinar a frequência por unidade e a reatância de magnetização do gerador. No estudo o GI é conectado em delta e são analisadas três configurações diferentes para a conexão do capacitor (em paralelo com a carga, conexão Steinmetz I e conexão Steinmetz II). É evidenciado que as conexões Steinmetz proporcionam melhor regulação de tensão. Experimentos utilizando uma máquina de indução de 2,2 kW confirmam a validade das análises teóricas e o método utilizado para a análise das configurações. Ainda, em [14] CHAN et al. apresentam um estudo semelhante ao apresentado em [1], porém adotando uma configuração utilizando dois capacitores de excitação.

MAHATO et al. [15] analisam o comportamento do GITAE, conectado em estrela, utilizando três capacitores (conectados em série e em paralelo com uma carga monofásica). Destacam que a regulação de tensão do gerador é muito pequena devido ao uso dos três capacitores. O modelo dinâmico do gerador foi desenvolvido com base na teoria dos eixos de referência considerando um referencial estacionário em relação ao estator. O modelo para análise em regime permanente também foi desenvolvido. Resultados de ambas as análises, transiente e em regime permanente, são comparados com resultados experimentais.

1.1.3 Determinação da capacitância requerida para a auto-excitação

CHAN [16] apresenta uma metodologia para o cálculo da mínima capacitância requerida para os capacitores, considerando um GITAE, inicialmente em vazio e posteriormente alimentando uma carga RL equilibrada e trifásica. Descreve que para que ocorra o processo de auto-excitação a combinação entre carga e banco de capacitores deve resultar em um ponto de operação na qual a indutância de magnetização do GI seja menor que o valor não-saturado. Considerando que a indutância de magnetização assuma o valor não-saturado, é possível obter analiticamente o mínimo valor da capacitância requerido para que o processo de auto-excitação ocorra. Por fim, resultados computacionais são comparados com resultados práticos, validando a metodologia apresentada.

WANG et al. [17] descrevem uma técnica baseada em autovalores para análise e predição dos valores mínimo e máximo de capacitância requeridos para a auto-excitação de um GITAE. Análises referentes à sensibilidade do valor mínimo da capacitância com relação à tensão nos terminais do gerador, ao valor da reatância de magnetização, ao tipo de carga e à velocidade imposta ao rotor do gerador são efetuadas. Resultados experimentais são obtidos em uma máquina de indução trifásica, conectada em estrela, operando como um gerador com velocidade constante. Por fim, estes resultados são comparados com os resultados analíticos, validando a técnica proposta.

CHAKRABORTY et al. [18] apresentam um método direto derivado das análises de *loop* e *nodal* para encontrar o valor da capacitância mínima de excitação requerida para um GITAE autônomo. Descrevem e analisam a dependência deste valor em função da velocidade imposta ao eixo do gerador e da carga acoplada aos terminais do gerador. É utilizado um modelo “inverso- I ” da máquina de indução para estudo do GITAE alimentando cargas RL (resistência em série com indutância). Os resultados analíticos obtidos são validados através de comparações com curvas experimentais.

CHAN et al. [19] descrevem um método para a determinação da mínima capacitância requerida para que ocorra o processo de auto-excitação de um GITAE conectado a um único capacitor e alimentando uma carga monofásica. Uma maior ênfase com relação à conexão Steinmetz é dada. Considerando a impedância de entrada do GI e condições de auto-excitação, duas equações não-lineares são obtidas. A solução de uma das equações, usando o método da secante, permite determinar a frequência de excitação e a mínima capacitância requerida pode ser calculada a partir da segunda equação. Esta técnica de solução é posteriormente empregada em um procedimento iterativo para calcular a capacitância requerida para manter a tensão terminal na carga em um determinado valor. Resultados experimentais são obtidos utilizando-se uma máquina de indução de 2 kW como gerador, de modo a verificar as análises teóricas efetuadas.

MAHATO et al. [20] propõem um forma para determinação da máxima e mínima capacitância requerida para a auto-excitação de um GI trifásico, alimentando uma carga monofásica, a partir de uma abordagem matemática relacionando autovalores. Destacam que a capacitância mínima exigida diminui com o aumento da carga (considerando constante o FP). Ainda, observam que tradicionalmente as capacitâncias

mínimas e máximas necessárias para um GITAE são obtidas pela solução de um polinômio de elevada ordem com base no modelo por fase do GI. A vantagem do método proposto é a simplicidade apresentada pelo mesmo, uma vez que o procedimento de solução do polinômio de ordem superior é evitado. A configuração analisada trata-se de um GI trifásico conectado em estrela associado a três capacitores e alimentando uma carga monofásica. O desenvolvimento do modelo dinâmico do GI baseia-se no modelo dq considerando um sistema de referência estacionário em relação ao estator e as equações referentes aos capacitores de excitação são descritas por um modelo de três fases abc assumindo uma velocidade constante ao gerador. Os valores de capacitâncias obtidos pelo método proposto foram comparados com aqueles obtidos pelo método convencional e verificou-se experimentalmente a validade e a precisão dos resultados obtidos.

1.2 Objetivos gerais

Este trabalho tem como principal objetivo o estudo do GITAE acionado a uma velocidade constante e operando de forma autônoma (não conectado a rede elétrica).

As análises são efetuadas a partir do equacionamento matemático dos circuitos equivalente da máquina de indução, considerando a mesma acoplada a diferentes tipos de carga (monofásica, trifásica equilibrada e trifásica desequilibrada) e acoplada a um banco de capacitores.

Busca-se também apresentar um método para o dimensionamento do banco de capacitores necessário para operação do gerador, uma vez que tal banco desempenha uma importante função no sistema, pois além de possibilitar a auto-excitação, tem o papel de manter a tensão nos terminais¹ do gerador em um ponto de operação estável quando do acoplamento da carga.

1.3 Objetivos específicos

Neste trabalho foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- Revisão bibliográfica;

¹ A tensão nos terminais do gerador depende, além do capacitor, da própria impedância da carga e da velocidade imposta ao gerador.

- Equacionamento matemático do GI a partir dos circuitos equivalentes da máquina de indução;
- Equacionamento matemático referente às diversas configurações estudadas;
- Apresentação de um modelo matemático para representar a curva “indutância de magnetização *versus* corrente de magnetização”;
- Descrição de um procedimento de cálculo para a determinação do valor dos capacitores a serem utilizados para a auto-excitação do GI;
- Desenvolvimento de um programa computacional utilizando o *software* MATLAB para a simulação do gerador sob diversas configurações e condições de funcionamento;
- Verificação da validade dos cálculos realizados para a determinação da mínima capacitância requerida através das simulações;
- Análise geral dos resultados obtidos.

1.4 Organização da dissertação

Para abordar e expor todos os objetivos específicos a presente dissertação apresenta 7 capítulos, sendo os capítulos 1 e 7 destinados a introdução geral (juntamente com uma breve revisão bibliográfica) e a conclusão, respectivamente. Apresenta também dois anexos e referências bibliográficas.

No capítulo 2 é apresentado o equacionamento matemático do GI, a partir dos circuitos equivalentes da máquina de indução.

Já no capítulo 3 é descrito de que forma são levantados os dados da curva de saturação da máquina de indução a partir do ensaio em vazio da mesma, de forma a obter pontos da curva “indutância de magnetização *versus* corrente de magnetização”. Posteriormente, ainda no capítulo 3, é descrito de que forma é possível obter as reatâncias de dispersão e resistências por fase do estator e do rotor a partir do ensaio com rotor bloqueado.

No capítulo 4 é apresentado o equacionamento matemático referente ao banco de capacitores e a carga para as diferentes configurações analisadas.

No capítulo 5 é descrito um procedimento de cálculo para a determinação da mínima capacitância requerida para a auto-excitação.

O capítulo 6, por sua vez, apresenta os principais resultados obtidos e a análise dos mesmos.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DO GERADOR DE INDUÇÃO

2.1 Representação do GI a partir de circuitos equivalentes

O GI trifásico, simétrico, com rotor curto-circuitado pode ser representado pelos circuitos equivalentes ilustrados na Figura 2.1.

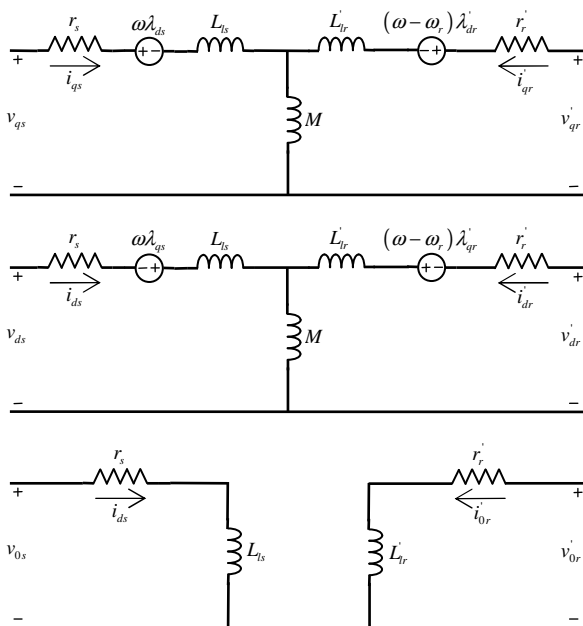


Figura 2.1 – Circuitos equivalentes segundo a transformação de Park para um GI trifásico, simétrico, com rotor curto-circuitado [21].

Para as variáveis apresentadas na Figura 2.1, os sub-índices q , d e 0 indicam os eixos de referência, s e r indicam, respectivamente, grandezas referentes ao estator e ao rotor e o sobre-índice ' indica grandezas do rotor referidas ao estator.

Como o rotor da máquina de indução é curto-circuitado, as tensões v_{qd0r} , ou seja, as tensões v_{qr} , v_{dr} e v_{0r} , são iguais a zero, assim como as tensões do sistema trifásico referentes ao rotor, v_{abc} .

2.2 Equacionamento dos circuitos equivalentes

A partir da análise dos circuitos apresentados na Figura 2.1 é possível obter as equações que regem o comportamento do GI.

Outras equações, considerando o banco de capacitores e a carga, também devem ser obtidas (as mesmas serão apresentadas no capítulo 4), de forma a representar o GITAE alimentando uma carga trifásica do tipo RL.

É importante destacar que no estudo aqui apresentado o GI apresenta velocidade constante, independente da carga acoplada ao mesmo. Desta forma, têm-se no estator do gerador, tensões terminais com formas de ondas sinusoidais que apresentam frequências constantes.

2.2.1 Equações referentes ao modelo do gerador

Escrevendo as equações de tensão, tem-se que (os pontos sobrescritos nas variáveis indicam derivadas temporais de primeira ordem):

$$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \omega \cdot \lambda_{ds} + \dot{\lambda}_{qs} \quad (2.1),$$

$$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} - \omega \cdot \lambda_{qs} + \dot{\lambda}_{ds} \quad (2.2),$$

$$v_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + \dot{\lambda}_{0s} \quad (2.3),$$

$$v'_{qr} = r'_r \cdot i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{dr} + \dot{\lambda}'_{qr} \quad (2.4),$$

$$v'_{dr} = r'_r \cdot i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{qr} + \dot{\lambda}'_{dr} \quad (2.5),$$

$$v'_{0r} = r'_r \cdot i'_{0r} + \dot{\lambda}'_{0r} \quad (2.6).$$

Já as equações de enlace de fluxo são dadas por:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + M \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.7),$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + M \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.8),$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} \cdot i_{0s} \quad (2.9),$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} \cdot i'_{qr} + M \cdot (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (2.10),$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} \cdot i'_{dr} + M \cdot (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (2.11),$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} \cdot i'_{0r} \quad (2.12).$$

Substituindo as equações de enlace de fluxo (equações (2.7) à (2.12)) de forma apropriada nas equações de tensão (equações (2.1) à (2.6)), obtém-se:

$$-v_{qs} + \left(r_s + \dot{M} \right) \cdot i_{qs} + \omega \cdot (L_{ls} + M) \cdot i_{ds} + \dot{M} \cdot i'_{qr} + \quad (2.13),$$

$$+ \omega \cdot M \cdot i'_{dr} + (L_{ls} + M) \cdot \dot{i}_{qs} + M \cdot \dot{i}'_{qr} = 0$$

$$-v_{ds} - \omega \cdot (L_{ls} + M) \cdot i_{qs} + \left(r_s + \dot{M} \right) \cdot i_{ds} - \omega \cdot M \cdot i'_{qr} + \quad (2.14),$$

$$+ \dot{M} \cdot i'_{dr} + (L_{ls} + M) \cdot \dot{i}_{ds} + M \cdot \dot{i}'_{dr} = 0$$

$$-v_{0s} + r_s \cdot i_{0s} + L_{ls} \cdot \dot{i}_{0s} = 0 \quad (2.15),$$

$$\dot{M} \cdot i_{qs} + (\omega - \omega_r) \cdot M \cdot i_{ds} + \left(r'_r + \dot{M} \right) \cdot i'_{qr} + \quad (2.16),$$

$$+ (\omega - \omega_r) \cdot (L'_{lr} + M) \cdot i'_{dr} + M \cdot \dot{i}_{qs} + (L'_{lr} + M) \cdot \dot{i}'_{qr} = 0$$

$$- (\omega - \omega_r) \cdot M \cdot i_{qs} + \dot{M} \cdot i_{ds} - (\omega - \omega_r) \cdot (L'_{lr} + M) \cdot i'_{qr} + \quad (2.17),$$

$$+ \left(r'_r + \dot{M} \right) \cdot i'_{dr} + M \cdot \dot{i}_{ds} + (L'_{lr} + M) \cdot \dot{i}'_{dr} = 0$$

$$r'_r \cdot i'_{0r} + L'_{lr} \cdot \dot{i}'_{0r} = 0 \quad (2.18).$$

2.3 Torque eletromagnético

Com relação ao torque eletromagnético, o mesmo é dado pela seguinte expressão [21]:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot M \cdot (i_{qs} \cdot i'_{dr} - i_{ds} \cdot i'_{qr}) \quad (2.19).$$

Já a equação mecânica que expressa este torque é dada por:

$$T_e = J \cdot \frac{2}{p} \cdot \dot{\omega}_r + T_L \quad (2.20).$$

Em termos gerais, fazendo uso das equações (2.19) e (2.20), tem-se que o torque de carga é expresso por:

$$T_L = \frac{3}{4} \cdot p \cdot M \cdot i'_{dr} \cdot i_{qs} - \frac{3}{4} \cdot p \cdot M \cdot i'_{qr} \cdot i_{ds} - J \cdot \frac{2}{p} \cdot \dot{\omega}_r \quad (2.21).$$

Para o caso particular com ω_r constante, tem-se $T_L = T_e$, conforme a equação (2.19).

2.4 Potências de entrada e de saída

A potência de entrada para o GI, desconsiderando as perdas ferromagnéticas e mecânicas, pode ser expressa por:

$$P_{ent} = P_{saída} + P_{cobre} \quad (2.22).$$

Já a potência de saída é expressa por (considerando uma carga trifásica equilibrada):

$$P_{saída} = v_{as} \cdot i_{as} + v_{bs} \cdot i_{bs} + v_{cs} \cdot i_{cs} \quad (2.23),$$

ou ainda, expressando em variáveis do sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator [21]:

$$P_{saída} = \frac{3}{2} \cdot (v_{qs} \cdot i_{qs} + v_{ds} \cdot i_{ds} + 2 \cdot v_{0s} \cdot i_{0s}) \quad (2.24).$$

Já para uma carga trifásica desequilibrada:

$$P_{saída} = R_a \cdot (i_{za})^2 + R_b \cdot (i_{zb})^2 + R_c \cdot (i_{zc})^2 \quad (2.25),$$

expressando em variáveis do sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator:

$$\begin{aligned} P_{saída} = & R_a \cdot (i_{zq} + i_{z0}) + R_b \cdot \left(-\frac{1}{2}i_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \right) + \\ & + R_c \cdot \left(-\frac{1}{2}i_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \right) \end{aligned} \quad (2.26).$$

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DA SATURAÇÃO

A indutância de magnetização mútua entre estator e rotor, M , pode ser obtida através do ensaio em vazio da máquina de indução. É importante destacar que o valor da mesma varia de acordo com o valor da corrente de magnetização, I_m .

A seguir será descrito como pode ser realizado o ensaio em vazio da máquina, bem como, um modelo matemático de forma a avaliar o valor da indutância de magnetização em função da corrente eficaz de magnetização.

3.1 Ensaio em vazio

Através do ensaio em vazio, pode-se determinar a relação existente entre a indutância de magnetização e a corrente de magnetização da máquina.

Neste ensaio, nenhuma carga é imposta ao rotor. Aplica-se inicialmente uma tensão reduzida ao estator da máquina e quando a mesma estiver operando em regime permanente aplica-se a tensão nominal (ou até 125% da tensão nominal). Neste caso, o escorregamento, s , possui um valor pequeno, menor que o valor nominal. Desta maneira, o circuito equivalente da máquina pode ser simplificado (ver Figura 3.1).

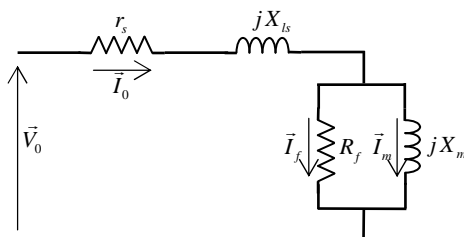


Figura 3.1 – Circuito equivalente simplificado, por fase, da máquina de indução, considerando o ensaio em vazio [22].

Na Figura 3.1 considera-se a máquina operando em regime permanente e sob forma de ondas sinusoidais, o que possibilita a representação fasorial de algumas grandezas (sobrescrito \rightarrow e $j = \sqrt{-1}$).

Nestas condições, a potência consumida pelo motor está suprimindo as perdas por efeito Joule no estator, as perdas no ferro e as perdas rotacionais (atrito, ventilação e suplementares). Devem ser medidos os valores de tensão e corrente nas três fases da máquina e o valor da potência trifásica. Tais valores devem ser transformados em valores por fase: V_0 , I_0 e P_0 [22].

A fim de determinar a parcela de cada perda presente na máquina, a partir da tensão nominal (ou com 125% da tensão nominal), anotam-se valores de tensão e potência de entrada para valores decrescente de tensão. Desta forma, é possível traçar uma curva “potência de entrada *versus* tensão” (ver Figura 3.2) com os valores medidos e extrapolando esta curva até o eixo das ordenadas, obter o valor das perdas rotacionais, uma vez que o ponto localizado sobre o eixo das ordenadas corresponde às perdas rotacionais, P_{rot} [22]. Na medida em que a tensão imposta é diminuída, a corrente de entrada também diminui. A partir de um valor de tensão, a corrente começa a aumentar, então, o ensaio é interrompido, desprezando estes últimos valores medidos.

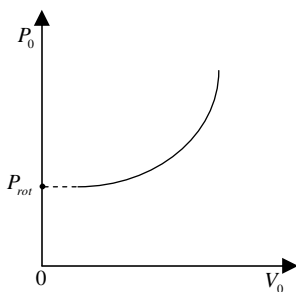


Figura 3.2 – A extrapolação da curva “potência de entrada *versus* tensão” permite encontrar o valor das perdas rotacionais, P_{rot} .

Já as perdas no ferro são dadas por:

$$P_{ferro} = P_0 - (I_0)^2 \cdot r_s - P_{rot} \quad (3.1),$$

que são constantes caso a tensão de entrada não varie muito.

Analisando o circuito apresentado pela Figura 3.1, tem-se que a tensão no ramo magnetizante pode ser calculada por:

$$\vec{E}_0 = V_0 \angle 0^\circ - (r_s + j \cdot X_{ls}) \cdot I_0 \angle -\varphi \quad (3.2),$$

com

$$\varphi = \arccos(P_0 / (V_0 \cdot I_0)) \quad (3.3).$$

A corrente que passa por R_f pode ser expressa como:

$$\vec{I}_f = I_f \angle \alpha \quad (3.4),$$

com

$$I_f = \frac{P_{ferro}}{E_0} \quad (3.5),$$

e

$$\alpha = \arg \vec{E}_0 \quad (3.6).$$

A equação (3.6) indica que o ângulo de fase de \vec{I}_f , α , é o mesmo ângulo da tensão \vec{E}_0 , uma vez que a impedância por onde essa corrente atravessa é caracterizada por um fasor com apenas componente real.

A partir de \vec{I}_f pode-se obter a corrente de magnetização que atravessa X_m :

$$\vec{I}_m = \vec{I}_0 - \vec{I}_f \quad (3.7).$$

Fazendo o uso do valor obtido em (3.7), tem-se finalmente que:

$$R_f = \frac{E_0}{I_f} \quad (3.8),$$

$$X_m = \frac{E_0}{I_m} \Rightarrow M = \frac{X_m}{(2\pi f)} \quad (3.9).$$

O valor final de M pode ser obtido fazendo a média aritmética dos valores encontrados para cada fase. É importante destacar que este valor varia em função de I_m visto que a relação E_o/I_m não é constante.

Nos circuitos equivalentes apresentados no capítulo anterior (Figura 2.1) a resistência R_f é considerada infinita. Neste caso, considerando que a impedância do circuito do estator é muito menor que a reatância X_m , tem-se uma aproximação tal que:

$$X_m \cong \frac{V_0}{I_0} \Rightarrow M \cong \frac{1}{(2\pi f)} \cdot \frac{V_0}{I_0} \quad (3.10).$$

Para máquinas de baixa potência (poucos kVA e baixo rendimento) a aproximação apresentada em (3.10) pode levar a resultados distantes dos reais, visto que neste caso as máquinas apresentam perdas consideráveis em relação à potência nominal.

Já para máquinas de maior potência (rendimento mais elevado) a equação (3.10) pode ser empregada de forma mais satisfatória.

3.2 Modelagem de M em função de I_m

De forma a se empregar uma modelagem matemática para o valor de M em função de I_m , tem-se a partir da Figura 2.1 que [6]:

$$I_m = \sqrt{(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2} \quad (3.11).$$

Em muitos artigos pesquisados a modelagem de M é empregada da seguinte forma: é fixado um valor constante para M até determinado valor de I_m , I_{m0} (região linear), e para valores de I_m superiores a I_{m0} uma determinada função matemática que relacione M em função de I_m é apresentada. Por exemplo, em [2] é apresentado o seguinte modelo:

$$M = \begin{cases} M_l & \text{se } I_m \leq I_{m0} \\ M_s & \text{se } I_m > I_{m0} \end{cases} \quad (3.12).$$

O valor de M_s é determinado pela seguinte equação:

$$M_s = C_1 \cdot \arctan(C_2 \cdot (I_m - I_{m0})) + C_3 \cdot (1 - \exp(-(I_m - I_{m0}))) + C_4 \cdot (I_m - I_{m0}) + C_5 \quad (3.13).$$

Os valores dos coeficientes C_1 , C_2 , C_3 , C_4 e C_5 , de forma que a equação (3.13) melhor represente o comportamento dos dados práticos, podem ser determinados através de métodos de otimização.

Uma forma mais simples e prática de modelar M em função de I_m é utilizando-se de uma equação polinomial. Optou-se, neste trabalho, por utilizar uma equação polinomial de sexto grau para tal modelagem. Evidentemente, equações polinomiais de maior grau tendem a representar melhor a relação existente entre M e I_m . No entanto, obteve-se uma modelagem satisfatória para a relação ao se fazer uso de uma equação de sexto grau, conforme pode ser observado na Figura 3.3.

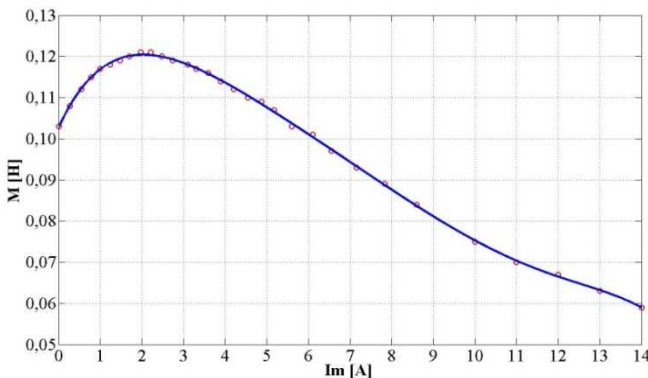


Figura 3.3 – M em função de I_m (aproximação por um polinômio de grau 6).

A equação polinomial que representa a relação entre M e I_m (Figura 3.3) é dada por:

$$M(I_m) = -8,428 \cdot 10^{-8} \cdot I_m^6 + 4,123 \cdot 10^{-6} \cdot I_m^5 - 8,499 \cdot 10^{-5} \cdot I_m^4 + 9,808 \cdot 10^{-4} \cdot I_m^3 - 6,664 \cdot 10^{-3} \cdot I_m^2 + 1,773 \cdot 10^{-2} \cdot I_m + 0,104 \quad (3.14).$$

3.3. Ensaio com rotor bloqueado

Através do ensaio com rotor bloqueado, é possível determinar as reatâncias de dispersão e resistências do circuito equivalente do GI. Considerando o rotor bloqueado (escorregamento igual a 1), a corrente no ramo magnetizante é muito menor que a corrente de entrada, logo, este ramo pode ser desconsiderado e o circuito equivalente por fase da máquina de indução pode ser representado conforme a Figura 3.4 [23] (na figura, considera-se a máquina operando em regime permanente e sob forma de ondas sinusoidais).

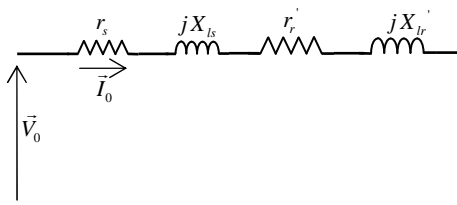


Figura 3.4 – Circuito equivalente simplificado, por fase, da máquina de indução, considerando o ensaio com rotor bloqueado.

A tensão aplicada ao estator da máquina de indução deve ser aumentada gradualmente até ser atingida a corrente nominal da máquina. Ainda, mede-se a potência associada ao ensaio, P_{bl} , e anotam-se os valores de tensão e corrente de fase, V_0 e I_0 .

O valor da resistência por fase do estator, r_s , é facilmente obtido através da média aritmética dos valores de resistência medidos, através do uso de um ohmímetro, em cada fase.

Determinado o valor de r_s , é possível determinar o valor da resistência por fase do rotor, referida ao estator, r_r' , uma vez que:

$$P_{bl} = 3 \cdot (r_s + r_r') \cdot (I_0)^2 \rightarrow r_r' = \frac{P_{bl}}{3 \cdot (I_0)^2} - r_s \quad (3.15).$$

A fim de determinar os valores das reatâncias de dispersão, com o rotor bloqueado, tem-se que:

$$R_{bl} = r_s + r_r' \quad (3.16),$$

$$Z_{bl} = \frac{V_0}{I_0} \quad (3.17),$$

e

$$X_{bl} = \sqrt{(Z_{bl})^2 - (R_{bl})^2} \quad (3.18).$$

O valor da reatância de dispersão por fase do rotor, referida ao estator, X_{lr}' , pode ser expressa por [23]:

$$X_{lr}' = \frac{X_{bl}}{1 + k_x} \quad (3.19).$$

Já o valor da reatância de dispersão por fase do estator, X_{ls} , pode se expressa por [23]:

$$X_{ls} = k_x \cdot X_{lr}' \quad (3.20).$$

Nas equações (3.19) e (3.20) k_x representa uma constante e assume valores de acordo com a categoria da máquina de indução, conforme se observa na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Valores assumidos para k_x de acordo com a categoria da máquina de indução [23].

categoria	k_x
Rotor bobinado	1,00
D	1,00
N	0,67
H	0,43

CAPÍTULO 4

EQUAÇÕES REFERENTES AO BANCO DE CAPACITORES E A CARGA

4.1 GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela

Neste item serão abordadas as configurações nas quais a carga e o banco de capacitores estão conectados em estrela. Considerou-se o GI também conectado em estrela, com o estator apresentando 3 ou 4 fios terminais.

4.1.1 Terminais do gerador com 4 fios

Neste caso, tem-se uma configuração conforme a apresentada pela Figura 4.1 com todos os pontos neutros interligados:

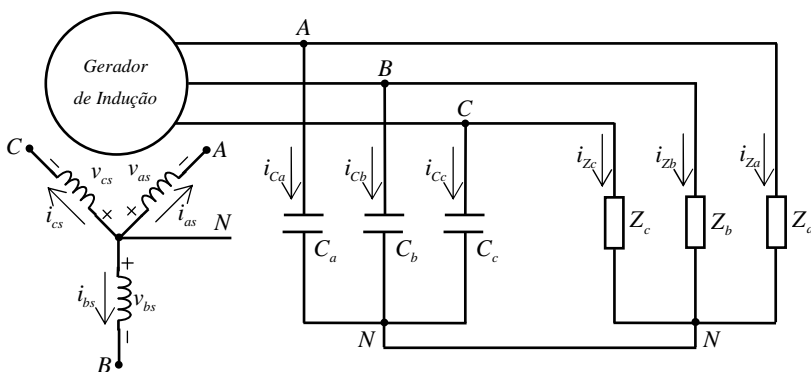


Figura 4.1 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 4 fios).

Escrevendo as três equações referentes ao somatório das correntes nas três fases, tem-se que:

$$i_{as} = i_{Ca} + i_{Za} \quad (4.1),$$

$$i_{bs} = i_{Cb} + i_{Zb} \quad (4.2),$$

$$i_{cs} = i_{Cc} + i_{Zc} \quad (4.3),$$

ou ainda,

$$i_{as} = -C_a \cdot \dot{v}_{as} + i_{Za} \quad (4.4),$$

$$i_{bs} = -C_b \cdot \dot{v}_{bs} + i_{Zb} \quad (4.5),$$

$$i_{cs} = -C_c \cdot \dot{v}_{cs} + i_{Zc} \quad (4.6).$$

A fim de reescrever as equações (4.4), (4.5) e (4.6), de forma a expressar as variáveis em um sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator, tem-se que (ver anexo A2):

$$[K_s] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4.7),$$

logo,

$$[K_s]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8),$$

e ainda,

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = [K_s]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{0s} \end{bmatrix} \quad (4.9).$$

Sendo assim, a partir da equação (4.9), tem-se que:

$$\begin{cases} v_{as} = v_{qs} + v_{0s} \\ v_{bs} = -\frac{1}{2}v_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} + v_{0s} \\ v_{cs} = -\frac{1}{2}v_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} + v_{0s} \end{cases} \quad (4.10).$$

Aplicando a mesma transformação para as correntes no estator e na carga trifásica:

$$\begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = [K_s]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} i_{as} = i_{qs} + i_{0s} \\ i_{bs} = -\frac{1}{2}i_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + i_{0s} \\ i_{cs} = -\frac{1}{2}i_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + i_{0s} \end{cases} \quad (4.11),$$

$$\begin{bmatrix} i_{za} \\ i_{zb} \\ i_{zc} \end{bmatrix} = [K_s]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} i_{qz} \\ i_{dz} \\ i_{0z} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} i_{za} = i_{qz} + i_{0z} \\ i_{zb} = -\frac{1}{2}i_{qz} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{dz} + i_{0z} \\ i_{zc} = -\frac{1}{2}i_{qz} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{dz} + i_{0z} \end{cases} \quad (4.12).$$

Por fim, substituindo as relações expressas em (4.10), (4.11) e (4.12), nas equações (4.4), (4.5) e (4.6), obtém-se:

$$i_{qs} + i_{0s} + C_a \cdot \left(\dot{v}_{qs} + \dot{v}_{0s} \right) - i_{zq} - i_{z0} = 0 \quad (4.13),$$

$$-\frac{1}{2}i_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + i_{0s} + C_b \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{v}_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{v}_{ds} + \dot{v}_{0s} \right) +$$

$$+\frac{1}{2}i_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} - i_{z0} = 0 \quad (4.14),$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2}i_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + i_{0s} + C_c \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{v}_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{v}_{ds} + \dot{v}_{0s} \right) + \\
& + \frac{1}{2}i_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} - i_{z0} = 0
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Relacionado as tensões na carga com as correntes na carga, considerando cargas formadas por uma resistência em série com uma indutância em cada uma das três fases, tem-se que:

$$-v_{as} = R_a \cdot i_{za} + L_a \cdot \dot{i}_{za} \tag{4.16},$$

$$-v_{bs} = R_b \cdot i_{zb} + L_b \cdot \dot{i}_{zb} \tag{4.17},$$

$$-v_{cs} = R_c \cdot i_{zc} + L_c \cdot \dot{i}_{zc} \tag{4.18},$$

Substituindo as relações expressas em (4.10) e (4.12), nas equações (4.16), (4.17) e (4.18), obtém-se:

$$-v_{qs} - v_{0s} - R_a \cdot (i_{zq} + i_{z0}) - L_a \cdot \left(\dot{i}_{zq} + \dot{i}_{z0} \right) = 0 \tag{4.19},$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2}v_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} - v_{0s} - R_b \cdot \left(-\frac{1}{2}i_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \right) + \\
& -L_b \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{i}_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_{zd} + \dot{i}_{z0} \right) = 0
\end{aligned} \tag{4.20},$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2}v_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} - v_{0s} - R_c \cdot \left(-\frac{1}{2}i_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \right) + \\
& -L_c \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{i}_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_{zd} + \dot{i}_{z0} \right) = 0
\end{aligned} \tag{4.21},$$

O conjunto de equações formado pelas equações (2.13), (2.14), (2.15), (2.16), (2.17), (2.18), (4.13), (4.14), (4.15), (4.19), (4.20) e (4.21) forma um sistema linear, que pode ser escrito como:

$$\underline{U} = [\underline{A}] \cdot \underline{X} + [\underline{B}] \cdot \dot{\underline{X}} \tag{4.22}.$$

Para o GITAE as matrizes que representam este sistema, considerando a máquina operando com velocidade constante no eixo, são dadas por (o sobre-índice T indica matriz transposta):

$$\underline{U}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4.23),$$

$$\underline{X}^T = [i_{qs} \ i_{ds} \ i_{0s} \ i_{qr}' \ i_{dr}' \ i_{0r}' \ v_{qs} \ v_{ds} \ v_{0s} \ i_{Zq} \ i_{Zd} \ i_{Z0}] \quad (4.24),$$

$$\dot{\underline{X}}^T = [\dot{i}_{qs} \ \dot{i}_{ds} \ \dot{i}_{0s} \ \dot{i}_{qr}' \ \dot{i}_{dr}' \ \dot{i}_{0r}' \ \dot{v}_{qs} \ \dot{v}_{ds} \ \dot{v}_{0s} \ \dot{i}_{Zq} \ \dot{i}_{Zd} \ \dot{i}_{Z0}] \quad (4.25),$$

$$A = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & b & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & 0 & b & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ b & c & 0 & d & e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & b & 0 & -e & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_r' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ -g & -h & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & h & -1 \\ -g & h & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & -h & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -R_a & 0 & -R_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & h & -1 & gR_b & hR_b & -R_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & -h & -1 & gR_c & -hR_c & -R_c \end{bmatrix} \quad (4.26),$$

sendo que:

$$a = r_s + \dot{M} \quad (4.27),$$

$$b = \dot{M} \quad (4.28),$$

$$c = -\omega_r \cdot M \quad (4.29),$$

$$d = r_r' + \dot{M} \quad (4.30),$$

$$e = -\omega_r \cdot (L_{rr}' + M) \quad (4.31),$$

$$g = \frac{1}{2} \quad (4.32),$$

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4.33),$$

$$B = \begin{bmatrix} k & 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{lr}' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_a & 0 & C_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -gC_b & -hC_b & C_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -gC_c & hC_c & C_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_a & 0 & -L_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & gL_b & hL_b & -L_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & gL_c & -hL_c & -L_c \end{bmatrix} \quad (4.34),$$

sendo que:

$$k = L_{ls} + M \quad (4.35),$$

$$m = L_{lr}' + M \quad (4.36).$$

4.1.2 Terminais do gerador com 3 fios

Neste caso tem-se uma configuração conforme a apresentada pela Figura 4.2 com apenas os pontos neutros do banco de capacitores e da carga interligados. Logo, não há circulação de corrente de sequência zero no estator do GI, e ainda, sendo a máquina simétrica, também não haverá tensão de sequência zero no estator.

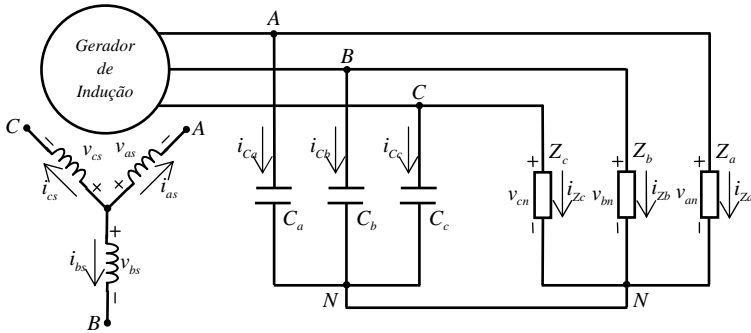


Figura 4.2 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 3 fios).

Para o GI, tem-se que (considerando um sistema estacionário em relação ao estator):

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -v_{abs} \\ -v_{bcs} \end{bmatrix} \quad (4.37).$$

Pode-se também expressar que:

$$-v_{abs} = -(v_{an} - v_{bn}) \quad (4.38),$$

$$-v_{bcs} = -(v_{bn} - v_{cn}) \quad (4.39).$$

Já as tensões v_{an} , v_{bn} e v_{cn} em um sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator são dadas por:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Zq} \\ v_{Zd} \\ v_{Z0} \end{bmatrix} \quad (4.40),$$

ou seja,

$$v_{an} = v_{Zq} + v_{Z0} \quad (4.41),$$

$$v_{bn} = -\frac{1}{2}v_{Zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{Zd} + v_{Z0} \quad (4.42),$$

$$v_{cn} = -\frac{1}{2}v_{Zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{Zd} + v_{Z0} \quad (4.43),$$

Substituindo as equações (4.41), (4.42) e (4.43) nas equações (4.38) e (4.39), tem-se que:

$$-v_{abs} = -\frac{3}{2}v_{Zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{Zd} \quad (4.44),$$

$$-v_{bcs} = \sqrt{3}v_{dZ} \quad (4.45).$$

Ainda, substituindo as equações (4.44) e (4.45) em (4.37):

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 0 & -\sqrt{3}/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (-3/2)v_{qz} + \left(-\sqrt{3}/2\right)v_{dz} \\ \sqrt{3}v_{dz} \end{bmatrix} \quad (4.46),$$

logo,

$$v_{qs} = -v_{qz} \quad (4.47),$$

$$v_{ds} = -v_{dz} \quad (4.48),$$

Escrevendo as três equações referentes ao banco de capacitores:

$$C_a \dot{v}_{an} = i_{sa} - i_{za} \quad (4.49),$$

$$C_b \dot{v}_{bn} = i_{sb} - i_{zb} \quad (4.50),$$

$$C_c \dot{v}_{cn} = i_{sc} - i_{zc} \quad (4.51).$$

Reescrevendo as equações (4.49), (4.50) e (4.51) de forma a expressar as variáveis em um sistema $dq\theta$ estacionário em relação ao estator, obtém-se:

$$C_a \cdot \left(\dot{v}_{qz} + \dot{v}_{0z} \right) - \left(i_{qs} - i_{qz} - i_{0z} \right) = 0 \quad (4.52),$$

$$C_b \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{v}_{qz} - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{v}_{dz} + \dot{v}_{0z} \right) - \left(-\frac{1}{2}i_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}i_{qz} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{dz} - i_{0z} \right) = 0 \quad (4.53),$$

$$C_c \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{v}_{qz} + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{v}_{dz} + \dot{v}_{0z} \right) - \left(-\frac{1}{2}i_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2}i_{qz} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{dz} - i_{0z} \right) = 0 \quad (4.54).$$

Relacionando as tensões na carga com as correntes na carga, tem-se que:

$$v_{an} = R_a \cdot i_{aZ} + L_a \cdot \dot{i}_{aZ} \quad (4.55),$$

$$v_{bn} = R_b \cdot i_{bZ} + L_b \cdot \dot{i}_{bZ} \quad (4.56),$$

$$v_{cn} = R_c \cdot i_{cZ} + L_c \cdot \dot{i}_{cZ} \quad (4.57).$$

Reescrevendo as equações (4.55), (4.56) e (4.57), de forma a expressar as variáveis em um sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator, obtém-se:

$$-v_{qZ} - v_{0Z} + R_a \cdot (i_{qZ} + i_{0Z}) + L_a \cdot \left(\dot{i}_{qZ} + \dot{i}_{0Z} \right) = 0 \quad (4.58),$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} v_{qZ} + \frac{\sqrt{3}}{2} v_{dZ} - v_{0Z} + R_b \cdot \left(-\frac{1}{2} i_{qZ} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{dZ} + i_{0Z} \right) + \\ + L_b \cdot \left(-\frac{1}{2} \dot{i}_{qZ} - \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{i}_{dZ} + \dot{i}_{0Z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.59),$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} v_{qZ} - \frac{\sqrt{3}}{2} v_{dZ} - v_{0Z} + R_c \cdot \left(-\frac{1}{2} i_{qZ} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{dZ} + i_{0Z} \right) + \\ + L_c \cdot \left(-\frac{1}{2} \dot{i}_{qZ} + \frac{\sqrt{3}}{2} \dot{i}_{dZ} + \dot{i}_{0Z} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.60).$$

O conjunto de equações formado pelas equações (2.13), (2.14), (2.16), (2.17), (4.52), (4.53), (4.54), (4.58), (4.59) e (4.60) forma um sistema linear como o descrito em (4.22).

Neste caso, as matrizes que representam este sistema são dadas por (considerando a máquina operando com velocidade constante no eixo):

$$\underline{U}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (4.61),$$

$$\underline{X}^T = \begin{bmatrix} i_{qs} & i_{ds} & i_{qr}' & i_{dr}' & v_{qZ} & v_{dZ} & v_{0Z} & i_{qZ} & i_{dZ} & i_{0Z} \end{bmatrix} \quad (4.62),$$

$$\underline{\dot{X}}^T = \begin{bmatrix} \dot{i}_{qs} & \dot{i}_{ds} & \dot{i}_{qr} & \dot{i}_{dr} & \dot{v}_{qz} & \dot{v}_{dz} & \dot{v}_{0z} & \dot{i}_{qz} & \dot{i}_{dz} & \dot{i}_{0z} \end{bmatrix} \quad (4.63),$$

$$A = \begin{bmatrix} a & 0 & b & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & b & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b & c & d & e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & b & -e & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ g & h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g & -h & 1 \\ g & -h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g & h & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & R_a & 0 & R_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & h & -1 & -gR_b & -hR_b & R_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g & -h & -1 & -gR_c & hR_c & R_c \end{bmatrix} \quad (4.64),$$

$$B = \begin{bmatrix} k & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_a & 0 & C_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -gC_b & -hC_b & C_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -gC_c & hC_c & C_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_a & 0 & L_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -gL_b & -hL_b & L_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -gL_c & hL_c & L_c \end{bmatrix} \quad (4.65).$$

4.2 GI com carga e banco de capacitores conectados em delta

Considerando o GI, a carga e o banco de capacitores conectados em delta, tem-se uma configuração conforme a apresentada pela Figura 4.3. Neste caso, não existe a componente de sequência zero nas correntes de linha e tensões de fase da máquina de indução [4]. Ainda, como a máquina de indução é considerada simétrica, também não existirá componente de sequência zero nas correntes de fase da mesma.

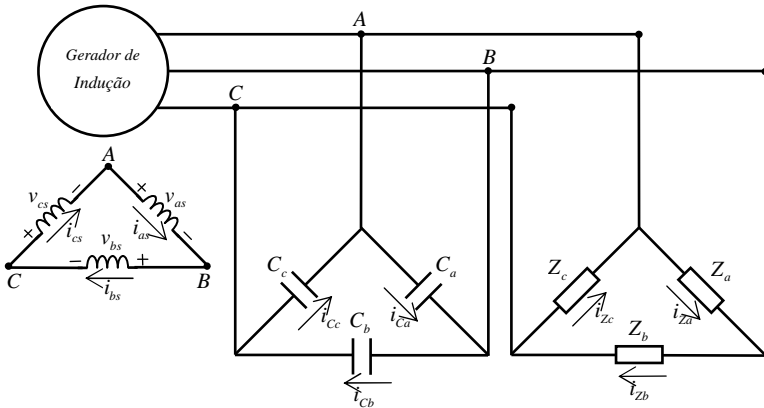


Figura 4.3 – GI com carga e banco de capacitores conectados em delta.

Escrevendo as três equações referentes ao somatório das correntes nas três fases, tem-se que:

$$i_{as} + i_{Ca} + i_{Za} = i_{bs} + i_{Cb} + i_{Zb} \quad (4.66),$$

$$i_{as} + i_{Ca} + i_{Za} = i_{cs} + i_{Cc} + i_{Zc} \quad (4.67),$$

$$i_{bs} + i_{Cb} + i_{Zb} = i_{cs} + i_{Cc} + i_{Zc} \quad (4.68),$$

Desconsiderando a equação (4.68), uma vez que a mesma pode ser obtida através da combinação linear entre as equações (4.66) e (4.67), pode-se, ainda, reescrever as equações (4.66) e (4.67) da seguinte forma:

$$i_{as} + C_a \cdot \dot{v}_{as} + i_{Za} = i_{bs} + C_b \cdot \dot{v}_{bs} + i_{Zb} \quad (4.69),$$

$$i_{as} + C_a \cdot \dot{v}_{as} + i_{Za} = i_{cs} + C_c \cdot \dot{v}_{cs} + i_{Zc} \quad (4.70).$$

Reescrevendo as equações (4.69) e (4.70), de forma a expressar as variáveis em um sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator, obtém-se:

$$\begin{aligned} i_{qs} + C_a \cdot \dot{v}_{qs} + i_{Zq} + i_{Z0} = & -\frac{1}{2}i_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + \\ & + C_b \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{v}_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{v}_{ds} \right) - \frac{1}{2}i_{Zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{Zd} + i_{Z0} \end{aligned}$$

$$\frac{3}{2}i_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + v_{qs} \cdot \left(C_a + \frac{C_b}{2} \right) + \frac{\sqrt{3}}{2}C_b \cdot v_{ds} + \frac{3}{2}i_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} = 0 \quad (4.71),$$

$$\begin{aligned} i_{qs} + C_a \cdot v_{qs} + i_{zq} + i_{z0} &= -\frac{1}{2}i_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + \\ &+ C_c \cdot \left(-\frac{1}{2}v_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} \right) - \frac{1}{2}i_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \\ \frac{3}{2}i_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds} + v_{qs} \cdot \left(C_a + \frac{1}{2}C_c \right) &- \frac{\sqrt{3}}{2}C_c v_{ds} + \frac{3}{2}i_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} = 0 \quad (4.72). \end{aligned}$$

Relacionando as tensões na carga com as correntes na carga, considerando cargas formadas por uma resistência em série com uma indutância em cada uma das três fases, tem-se que:

$$v_{as} = R_a \cdot i_{za} + L_a \cdot \dot{i}_{za} \quad (4.73),$$

$$v_{bs} = R_b \cdot i_{zb} + L_b \cdot \dot{i}_{zb} \quad (4.74),$$

$$v_{cs} = R_c \cdot i_{zc} + L_c \cdot \dot{i}_{zc} \quad (4.75).$$

Reescrevendo as equações (4.73), (4.74) e (4.75), de forma a expressar as variáveis em um sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator, obtém-se:

$$v_{qs} - R_a \cdot (i_{zq} + i_{z0}) - L_a \cdot \left(\dot{i}_{zq} + \dot{i}_{z0} \right) = 0 \quad (4.76),$$

$$-\frac{1}{2}v_{qs} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} - R_b \cdot \left(-\frac{1}{2}i_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \right) + \quad (4.77),$$

$$-L_b \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{i}_{zq} - \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_{zd} + \dot{i}_{z0} \right) = 0$$

$$-\frac{1}{2}v_{qs} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds} - R_c \cdot \left(-\frac{1}{2}i_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{zd} + i_{z0} \right) + \quad (4.78).$$

$$-L_c \cdot \left(-\frac{1}{2}\dot{i}_{zq} + \frac{\sqrt{3}}{2}\dot{i}_{zd} + \dot{i}_{z0} \right) = 0$$

O conjunto de equações formado pelas equações (2.13), (2.14), (2.16), (2.17), (4.71), (4.72), (4.76), (4.77) e (4.78) forma um sistema linear como o descrito em (4.22). Neste caso, tem-se (considerando a máquina operando com velocidade constante no eixo):

$$\underline{U}^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (4.79),$$

$$\underline{X}^T = \begin{bmatrix} i_{qs} & i_{ds} & i_{qr}' & i_{dr}' & v_{qs} & v_{ds} & i_{Zq} & i_{Zd} & i_{Z0} \end{bmatrix} \quad (4.80),$$

$$\dot{\underline{X}}^T = \begin{bmatrix} \dot{i}_{qs} & \dot{i}_{ds} & \dot{i}_{qr}' & \dot{i}_{dr}' & \dot{v}_{qs} & \dot{v}_{ds} & \dot{i}_{Zq} & \dot{i}_{Zd} & \dot{i}_{Z0} \end{bmatrix} \quad (4.81),$$

$$A = \begin{bmatrix} a & 0 & b & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 & b & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ b & c & d & e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c & b & -e & d & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3g & h & 0 & 0 & 0 & 0 & 3g & h & 0 \\ 3g & -h & 0 & 0 & 0 & 0 & 3g & -h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -R_a & 0 & -R_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g & -h & gR_b & hR_b & -R_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g & h & gR_c & -hR_c & -R_c \end{bmatrix} \quad (4.82),$$

$$B = \begin{bmatrix} k & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k & 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & hC_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u & -hC_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_a & 0 & -L_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & gL_b & hL_b & -L_b \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & gL_c & -hL_c & -L_c \end{bmatrix} \quad (4.83),$$

sendo que:

$$q = C_a + g C_b \quad (4.84),$$

$$u = C_a + g C_c \quad (4.85).$$

Juntamente com a resolução dos três sistemas lineares de equações diferenciais obtidos neste capítulo, é possível calcular o torque de carga (que no caso é igual ao torque eletromagnético, uma vez que a velocidade imposta ao GI é mantida constante), a potência de entrada e a potência de saída do sistema. Ainda, utilizou-se o método Runge-Kutta de 4ª ordem para resolução dos sistemas.

CAPÍTULO 5

CAPACITÂNCIA MÍNIMA REQUERIDA PARA A AUTO-EXCITAÇÃO

5.1 O Processo de auto-excitação

Quando um banco de capacitores, com valores de capacitância adequados, é conectado aos terminais de um GI trifásico acionado a uma determinada velocidade por uma máquina primária, ocorre o processo de auto-excitação do GI, uma vez que o mesmo aplicará sua tensão residual aos terminais dos capacitores. Em um processo de ressonância, os capacitores devolvem essa tensão ao GI e uma vez que o GI continua com uma tensão residual (devido à ação da máquina primária), a tensão nos terminais do GI sofre um acréscimo pela soma das duas tensões em fase (tensão residual e tensão nos terminais dos capacitores), iniciando a auto-excitação. Em um próximo ciclo, o gerador aplica uma tensão ainda maior aos capacitores e estes devolvem esta tensão ao gerador, caracterizando o mesmo processo de ressonância, assim sucessivamente, até ser atingido o ponto de operação definido pelo ponto de encontro da curva de saturação com a reta de reatância do capacitor.

Portanto, para cada valor de capacitância e velocidade de acionamento do rotor do GI, tem-se um ponto de operação diferente.

Fixando uma velocidade para o rotor e a carga que será acoplada aos terminais do GI, é possível determinar o valor mínimo de capacitância necessário para que o processo de auto-excitação possa ocorrer. Sendo assim, a seguir é apresentado um procedimento de cálculo para estipular o valor desta capacitância mínima.

5.2 Capacitância mínima requerida

5.2.1 Considerando uma configuração trifásica equilibrada

A Figura 5.1 ilustra o circuito equivalente, por fase, comumente usado para análise em regime permanente do GITAE equilibrado [16]. Todas as resistências, reatâncias e tensões expressas na figura estão referidas na frequência de base.

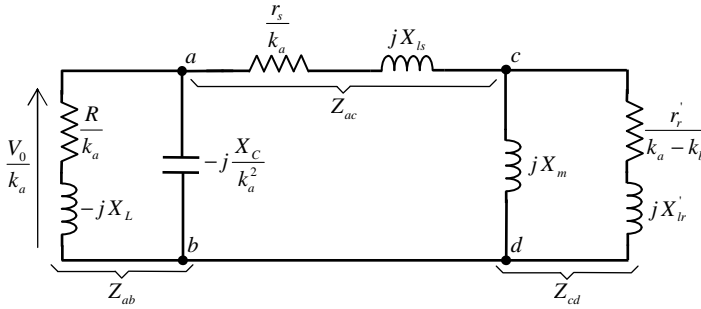


Figura 5.1 – Circuito equivalente, por fase, do GITAE.

Na Figura 5.1, k_b é a velocidade por unidade. Para uma frequência de base da ordem de 50 Hz e apresentando a máquina de indução 8 pólos, k_b é igual a 1,00 caso o gerador seja acionado a 750 rpm, já para o gerador acionado a 780 rpm, tem-se k_b igual a 1,04.

Para que ocorra o processo de auto-excitação, a combinação entre carga e capacitância, considerando o gerador operando a uma determinada velocidade constante, deve resultar um valor de reatância de magnetização mútua entre estator e rotor, X_m , menor que o valor não saturado desta reatância, X_{mi} , ainda, a condição $X_m = X_{mi}$ conduz a um mínimo valor para a capacitância de excitação, abaixo do qual a auto-excitação não ocorre.

Se a velocidade do GI é constante e a condição $X_m = X_{mi}$ é imposta, então as variáveis presentes na Figura 5.1 são somente a frequência por unidade, k_a , e a reatância capacitiva, X_C . Usando o método de impedância de *loop*, a auto-excitação requer que a soma das impedâncias no *loop* $abdca$ seja igual a zero [16], uma vez que:

$$V_{ab} + V_{ac} + V_{cd} = 0 \quad (5.1),$$

e como a corrente que atravessa Z_{ab} , Z_{ac} e Z_{cd} deve ser diferente de zero para que ocorra o processo de auto-excitação, necessariamente, tem-se que:

$$Z_{ab} + Z_{cd} + Z_{ac} = 0 \quad (5.2).$$

Igualando os termos relativos à parte real e imaginária da equação (5.1), respectivamente, a zero, obtém-se duas equações não-lineares:

$$F(k_a, X_C) = 0 \quad (5.3),$$

$$G(k_a, X_C) = 0 \quad (5.4).$$

O valor de k_a encontrado refere-se a frequência por unidade das tensões e correntes no estator (considerando que X_C assumo o valor calculado), sendo que para encontrar o valor desta frequência em *Hertz*, basta multiplicar k_a pela frequência de base estipulada.

Para cargas do tipo RL (resistência em série com uma indutância), uma das variáveis não pode ser facilmente isolada em umas das equações. Sendo assim, métodos iterativos são usados para resolver as duas equações simultaneamente.

No entanto, aplicando o método da admitância nodal, é possível determinar o valor de k_a independente do valor de X_C . Sendo assim, a Figura 5.1 pode ser redesenhada, conforme ilustra a Figura 5.2.

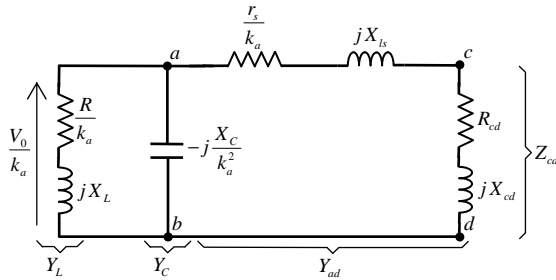


Figura 5.2 – Simplificação do circuito apresentado pela Figura 5.1.

Na Figura 5.2:

$$Z_{cd} = R_{cd} + jX_{cd} \quad (5.5),$$

onde:

$$R_{cd} = \frac{(k_a - k_b)(X_m)^2 r_r'}{(r_r')^2 + (k_a - k_b)^2 (X_m + X_{lr'})^2} \quad (5.6)$$

e

$$X_{cd} = \frac{(r_r')^2 X_m + (k_a - k_b)^2 X_m r_r' (X_m + X_{lr}')}{(r_r')^2 + (k_a - k_b)^2 (X_m + X_{lr}')^2} \quad (5.7).$$

A impedância entre os nós acd , Z_{ad} , é dada por:

$$Z_{ad} = R_{ad} + jX_{ad} \quad (5.8),$$

onde:

$$R_{ad} = \frac{r_s}{k_a} + R_{cd} \quad (5.9)$$

e

$$X_{ad} = X_{ls} + X_{cd} \quad (5.10).$$

Já as admitâncias Y_L e Y_{ad} são dadas por:

$$Y_L = \frac{k_a R}{(R)^2 + (k_a X_L)^2} - j \frac{(k_a)^2 X_L}{(R)^2 + (k_a X_L)^2} \quad (5.11),$$

$$Y_{ad} = \frac{R_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} - j \frac{X_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} \quad (5.12).$$

Pela lei de Kirchhoff, o somatório das correntes no nó a (ver Figura 5.2) deve ser igual a zero:

$$\frac{V_0}{k_a} (Y_C + Y_L + Y_{ad}) = 0 \quad (5.13).$$

Sendo assim, para que ocorra o processo de auto-excitação, tem-se necessariamente $V_0 \neq 0$, o que resulta em:

$$Y_C + Y_L + Y_{ad} = 0 \quad (5.14).$$

Igualando os termos relativos à parte real e imaginária da equação (5.14), respectivamente, a zero, tem-se:

$$\frac{k_a R}{(R)^2 + (k_a X_L)^2} + \frac{R_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} = 0 \quad (5.15)$$

e

$$\frac{(k_a)^2}{X_C} - \frac{(k_a)^2 X_L}{(R)^2 + (k_a X_L)^2} - \frac{X_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} = 0 \quad (5.16).$$

A equação (5.15) é independente do valor de X_C . Logo, a partir desta equação é possível determinar o valor de k_a .

Somente as raízes reais da equação (5.15) tem significado físico, e a maior raiz real e positiva, $k_{a_máx}$, corresponde ao menor valor de capacitância requerido, $C_{mín}$, para que ocorra o processo de auto-excitação.

Encontrado o valor de $k_{a_máx}$, a equação (5.16) pode ser utilizada de modo a encontrar o valor de $C_{mín}$:

$$C_{mín} = \frac{1}{2\pi f_b (k_{a_máx})^2} \left\{ \frac{(k_{a_máx})^2 X_L}{(R)^2 + (k_{a_máx} X_L)^2} + \frac{X_{ad}}{(R_{ad})^2 + (X_{ad})^2} \right\} \quad (5.17).$$

5.2.2 Considerando uma configuração monofásica

Considerando configurações monofásicas, conforme ilustra a Figura 5.3, é possível aplicar a mesma metodologia de cálculo apresentada no item anterior.

Para o GI conectado em estrela (Figura 5.3 (a)), tem-se κ igual a 1, já para o GI conectado em delta (Figura 5.3 (b)), tem-se κ igual a 3.

Pela lei de Kirchhoff, o somatório das correntes no nó a (ver Figura 5.4) deve ser igual a zero:

$$\frac{V_0}{k_a}(Y_C + Y_L + Y_{ad}) = 0 \quad (5.18).$$

Sendo assim, para que ocorra o processo de auto-excitação, tem-se necessariamente $V_0 \neq 0$, o que resulta em:

$$Y_C + Y_L + Y_{ad} = 0 \quad (5.19),$$

sendo que:

$$Y_Z = \frac{1}{\kappa Z_L} \quad (5.20),$$

$$Y_C = \frac{1}{\left(-j\kappa \frac{X_C}{(k_a)^2} \right)} \quad (5.21),$$

$$Y_{ad} = \frac{1}{Z_{ad}} \quad (5.22).$$

Ainda,

$$Z_{ad} = 2Z_1 + 2Z_2 + \frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4} + \frac{Z_3 Z_5}{Z_3 + Z_5} \quad (5.23),$$

sendo que:

$$Z_1 = \frac{r_s}{k_a} \quad (5.24),$$

$$Z_2 = jX_{ls} \quad (5.25),$$

$$Z_3 = jX_m \quad (5.26),$$

$$Z_4 = \frac{r_r'}{k_a - k_b} + jX_{lr}' \quad (5.27),$$

$$Z_5 = \frac{r_r'}{k_a + k_b} + jX_{lr}' \quad (5.28).$$

Substituindo a equação (5.23) em (5.22):

$$Y_{ad} = \frac{1}{\left(2Z_1 + 2Z_2 + \frac{Z_3 Z_4}{Z_3 + Z_4} + \frac{Z_3 Z_5}{Z_3 + Z_5} \right)} \quad (5.29).$$

Por fim, substituindo as equações (5.20), (5.21) e (5.29) na equação (5.19), obtém-se uma equação formada por dois termos, um real e outro imaginário. Igualando o termo real a zero, encontra-se o valor de $k_{a_m\acute{a}x}$. Posteriormente, igualando o termo imaginário a zero e fazendo uso do valor encontrado para $k_{a_m\acute{a}x}$, é possível encontrar finalmente o valor da mínima capacitância requerida, $C_{m\acute{i}n}$.

Os polinômios a serem resolvidos, tanto considerando uma carga trifásica quanto considerando uma carga monofásica, referentes ao termo real anteriormente citado igualado a zero, são de difícil solução. Logo, utilizou-se do *software* MATLAB para obtenção das raízes destes polinômios e consequentemente, assim, obter o valor de $k_{a_m\acute{a}x}$. Ainda, isolar os termos real e imaginário, referentes às equações (5.14) e (5.19), de forma analítica é dispendioso, principalmente considerando uma carga monofásica, sendo assim, é recomendável apenas substituir os termos referentes a cada admitância nas equações e posteriormente utilizar de um *software* (como o MATLAB) para obter a representação de cada termo em função das variáveis e resolver cada equação.

É importante destacar que há um valor máximo de capacitância que não deve ser excedido. Este valor é muitas vezes maior que o valor da mínima capacitância requerida, como pode ser observado pelos resultados e análises apresentados em [17].

CAPÍTULO 6

RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Programa elaborado

Primeiramente serão descritas as principais etapas executadas pelo programa elaborado, conforme indicadas pelo fluxograma apresentado pela Figura 6.1.

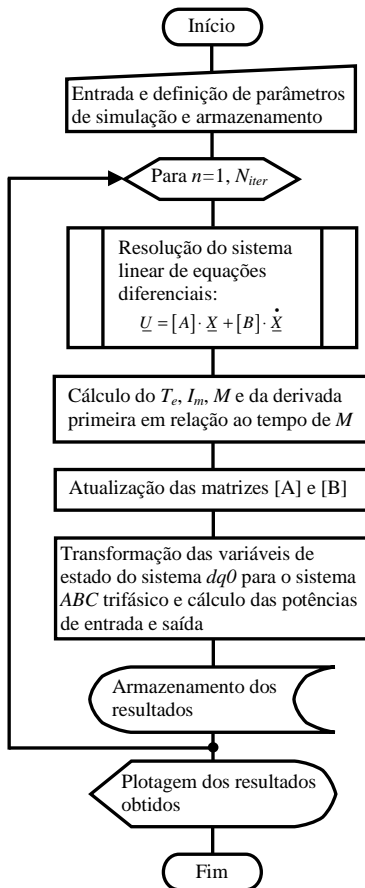


Figura 6.1 – Fluxograma referente ao programa elaborado.

Inicialmente, o programa elaborado recebe dados digitados pelo teclado. Esses dados podem ser subdivididos em quatro categorias:

1. dados referentes aos parâmetros do GI, tais como, indutâncias de dispersão e resistências por fase do estator e rotor, além dos coeficientes do polinômio de sexto grau que caracteriza a curva da indutância de magnetização mútua entre estator e rotor, M , em função da corrente de magnetização eficaz, I_m (substituindo $I_m=0$ na equação polinomial, obtém-se o valor inicial de M ; já a derivada primeira em relação ao tempo de M é fixada como sendo igual a zero inicialmente);

2. seleção da configuração a ser analisada, dentre as três configurações possíveis (ver Figuras 4.1, 4.2 e 4.3);

3. dados referentes ao banco de capacitores e a carga, isto é, valores para os três capacitores do banco, bem como valores para as resistências e indutâncias em cada fase;

4. dados referentes as condições iniciais impostas (pequenos valores de tensão para as variáveis v_{qs} , v_{ds} e v_{0s}), a velocidade imposta ao eixo do GI, ao tempo total de simulação e ao incremento temporal a ser utilizado.

Recebido os dados de entrada, o sistema linear de equações diferenciais $\underline{U} = [A] \cdot \underline{X} + [B] \cdot \dot{\underline{X}}$ é resolvido através da implementação do método Runge-Kutta de 4ª ordem.

Obtidos os valores das variáveis de estado, através da resolução do sistema $\underline{U} = [A] \cdot \underline{X} + [B] \cdot \dot{\underline{X}}$, o programa calcula o torque eletromagnético e a corrente de magnetização eficaz, I_m . Com o valor de I_m , obtém-se um novo valor para M através da simples substituição de I_m na equação polinomial de sexto grau que relaciona M em função de I_m . Ainda, calculado o valor de M , é possível obter o valor da derivada primeira de M em relação ao tempo pela equação:

$$\dot{M} = \frac{M_{i+1} - M_i}{\Delta t} \quad (6.1),$$

onde:

M_i = indutância de magnetização associada a iteração i ;

M_{i+1} = indutância de magnetização associada a iteração $i+1$;

Δt = incremento temporal.

Calculado novos valores para M e \dot{M} , as matrizes $[A]$ e $[B]$ são atualizadas.

Os valores calculados para as variáveis de estado são transformados do sistema $dq0$ para o sistema ABC trifásico, e ainda, são calculadas as potência de entrada e saída do sistema, sendo estes resultados obtidos (correntes e tensões no sistema ABC trifásico e potências) armazenados.

Posteriormente o programa retorna a solucionar o sistema $\underline{U} = [A] \cdot \underline{X} + [B] \cdot \dot{\underline{X}}$ e segue as rotinas descritas nos três parágrafos anteriores. Isto ocorre até certo número de iterações.

Realizadas todas as iterações, o programa exibe os gráficos referentes aos resultados obtidos.

Também é possível simular desacoplamentos e acoplamentos de capacitores e carga, bem como variações de velocidades impostas ao GI ao longo do tempo. No entanto, para isto, se fazem necessárias algumas mudanças no código-fonte do programa.

6.2 GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (gerador com 3 fios)

Inicialmente é importante destacar que a máquina de indução utilizada neste trabalho é a mesma da referência [25] e suas características são apresentadas no anexo A1.

Neste item, analisou-se a configuração apresentada na Figura 6.2 (que é idêntica a Figura 4.2). Simulações prévias validaram os resultados obtidos, uma vez que foram obtidos os mesmos resultados apresentados na referência [25] quando considerados os mesmos valores de capacitância, carga e velocidade do GI apresentados em [25]. Ainda, pode-se confirmar a validação dos resultados obtidos, comparando-os com os resultados obtidos através do SIMULINK, que apresenta um modelo para a máquina de indução com três fios e conectada em estrela.

Sendo assim, de forma a validar previamente os resultados obtidos através das simulações efetuadas, foram fixados os mesmos parâmetros para a velocidade do GI, capacitâncias e carga, conforme uma análise apresentada em [25]. Com isto busca-se a repetibilidade dos resultados presentes em [25].

A velocidade imposta ao GI é de 780 rpm e a capacitância dos capacitores igual a 120 μF . As condições de carga são:

- $R_a = 38,5 \, \Omega$ e $L_a = 0$;
- $R_b = 50 \, \Omega$ e $L_b = 24 \, \text{mH}$;
- $R_c = 260 \, \Omega$ e $L_c = 50 \, \text{mH}$.

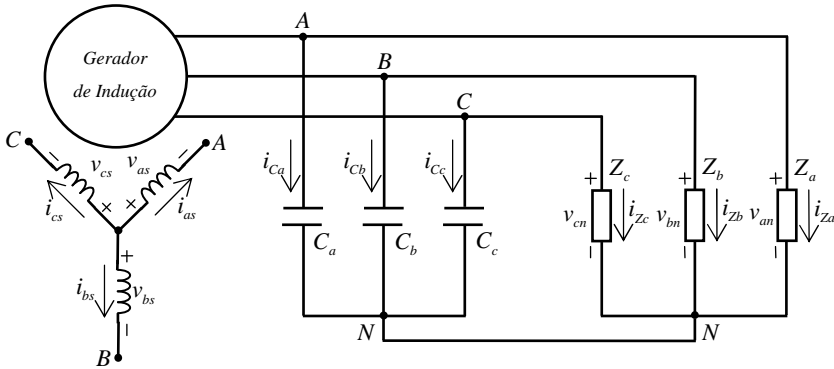


Figura 6.2 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 3 fios).

As Figuras 6.3 e 6.5 ilustram resultados retirados de [25]. Já as Figuras 6.4 e 6.6 ilustram os resultados obtidos através das simulações com o programa elaborado. É possível observar uma boa concordância entre ambos os resultados, validando assim o programa elaborado.

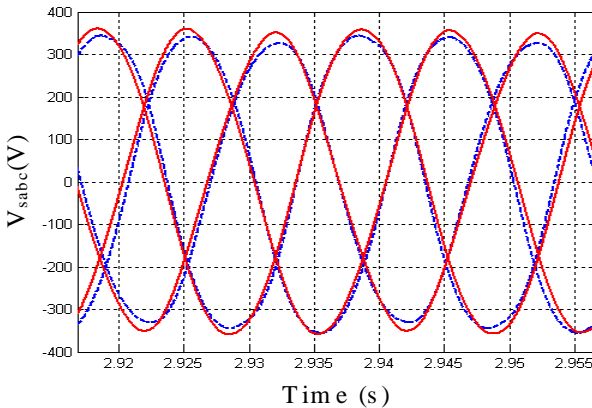


Figura 6.3 – Tensões no estator do GI, em regime permanente, em função do tempo. Em vermelho, resultado simulado; em azul e tracejado, resultado experimental [25].

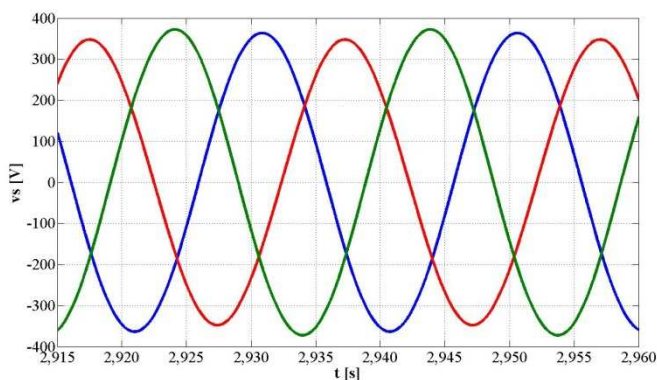


Figura 6.4 – Tensões no estator do GI, em regime permanente, em função do tempo (resultado obtido através do programa elaborado). Em azul, v_{as} ; em vermelho, v_{bs} ; em verde, v_{cs} .

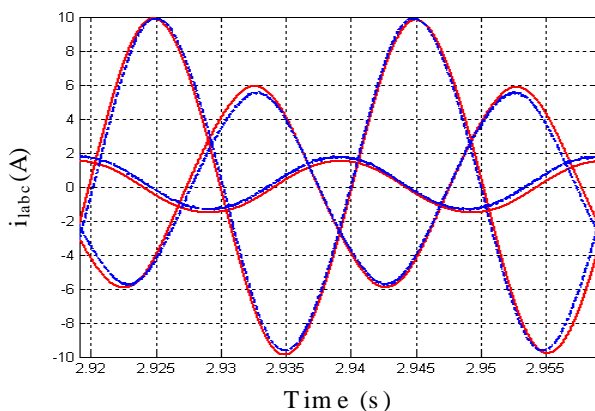


Figura 6.5 – Correntes na carga, em regime permanente, em função do tempo. Em vermelho, resultado simulado; em azul e tracejado, resultado experimental [25].

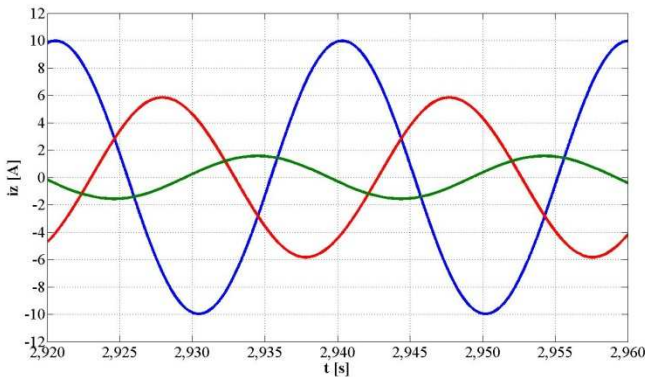


Figura 6.6 – Correntes na carga, em regime permanente, em função do tempo (resultado obtido através do programa elaborado). Em azul, i_{as} ; em vermelho, i_{bs} ; em verde, i_{cs} .

Outros resultados apresentados em [25] também foram obtidos através das simulações, no entanto, a necessidade de outras comparações é dispensável, não sendo de interesse deste trabalho reproduzir os resultados presentes em [25], e sim, validar o programa elaborado.

6.2.1 Carga resistiva, trifásica e equilibrada

Neste item, considerou-se uma carga resistiva, trifásica e equilibrada, sendo o valor da resistência de carga igual a $50 \, \Omega$ por fase. A máquina de indução opera na velocidade de 750 rpm.

Desta forma, calculou-se a capacitância mínima necessária para que o processo de auto-excitação pudesse ocorrer, obtendo-se o valor de $94 \, \mu\text{F}$. Logo, foi escolhido um valor de capacitância igual a $110 \, \mu\text{F}$ para todos os capacitores do banco de capacitores.

Na Figura 6.7 observa-se um transitório na forma de onda da tensão v_{as} no intervalo compreendido entre 0 e 3,7 s. Após 3,7 s o GI entra em regime permanente e a tensão v_{as} apresenta forma de onda sinusoidal com amplitude de 279,9 V e frequência de 48,4 Hz. É importante destacar que o intervalo de tempo em que o GI opera em regime transitório depende das condições iniciais do sistema e na prática depende do fluxo remanente na máquina de indução, o qual pode ser diferente depois de cada utilização da máquina.

Para termos de comparação, é apresentada na Figura 6.8 o resultado de simulação utilizando o modelo da máquina de indução presente no SIMULINK. Assim como a Figura 6.7, a Figura 6.8 também ilustra o comportamento da tensão v_{as} ao longo tempo. As condições iniciais impostas ao GI tanto na simulação efetuada no programa elaborado no *software* MATLAB (Figura 6.7) quanto na simulação com o uso do SIMULINK (Figura 6.8) são as mesmas. Sendo assim é possível observar que as curvas expostas por ambas as figuras apresentam uma boa concordância com relação à amplitude da tensão v_{as} , bem como em relação ao intervalo de tempo do regime transitório. Tem-se que a constante de tempo para o transitório do sinal apresentado na Figura 6.7 é da ordem de 3,07 s, já para o transitório do sinal apresentado na Figura 6.8 é da ordem de 3,00 s.

Na Figura 6.8, tem-se que em regime permanente a tensão v_{as} apresenta forma de onda sinusoidal com amplitude de 270,4 V e frequência de aproximadamente 48,0 Hz.

A diferença entre as Figuras 6.7 e 6.8 e os resultados extraídos das mesmas deve-se principalmente a modelagem da saturação. No SIMULINK apenas entra-se com valores para a curva de saturação para a região não linear e estipula-se um valor constante para M na região linear. Enquanto nas simulações efetuadas através do programa elaborado é fixada uma equação polinomial de grau 6 que representa M em função de I_m .

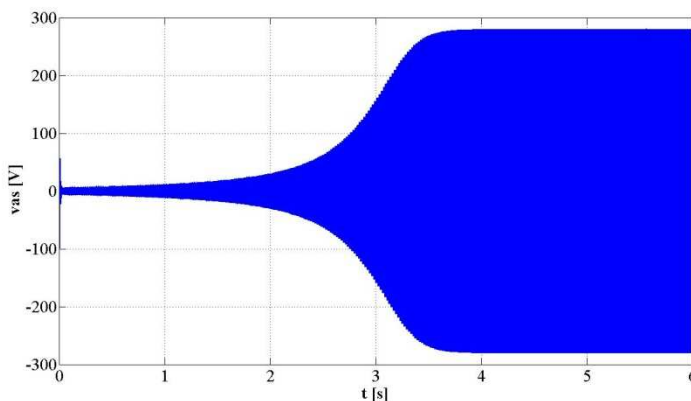


Figura 6.7 – Evolução da tensão v_{as} ao longo do processo de auto-excitação (resultado obtido através do programa elaborado).

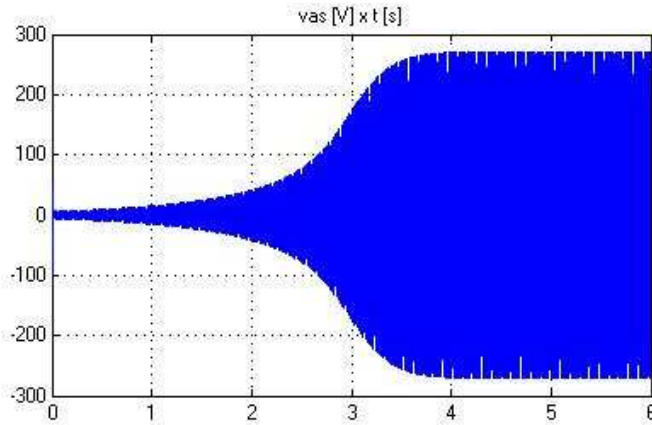


Figura 6.8 – Evolução da tensão v_{as} ao longo do processo de auto-excitação (resultado obtido através do SIMULINK).

A figura 6.9 apresenta a perda de excitação que ocorre nos terminais do GI quando os capacitores decaem para um valor abaixo do valor mínimo requerido ($94 \mu\text{F}$). No caso, decaem de $110 \mu\text{F}$ para $80 \mu\text{F}$ em $t = 5,0$ s.

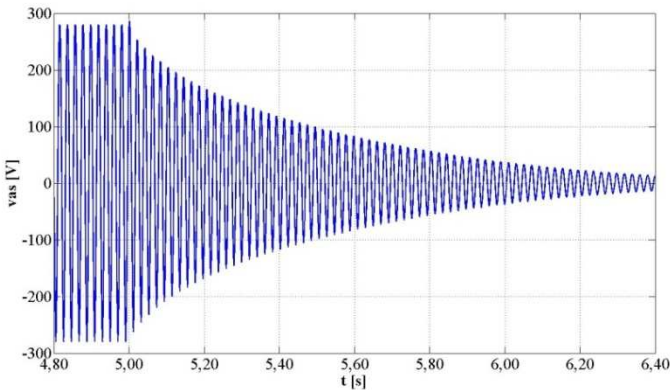


Figura 6.9 – Perda da excitação do GI quando os capacitores decaem para um valor abaixo do valor mínimo requerido.

A Figura 6.10 ilustra o comportamento em regime permanente das tensões no GI, nos capacitores e na carga trifásica. Como o banco de capacitores e a carga são equilibrados, têm-se tensões equilibradas nas três fases do GI. As tensões na carga são iguais às tensões nos capacitores (ambas equilibradas também), visto que a carga está conectada em paralelo com o banco de capacitores.

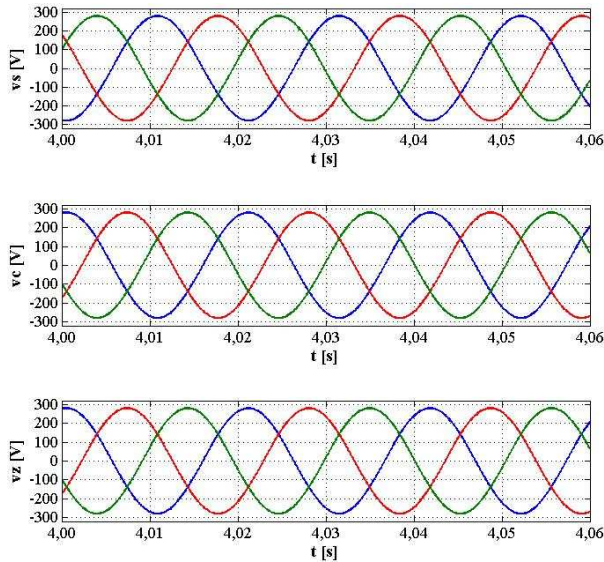


Figura 6.10 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_C , e na carga trifásica, v_Z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc} .

Já a Figura 6.11 ilustra o comportamento das correntes em regime permanente. Pode-se observar na figura, que assim como as tensões v_s , v_C e v_Z , as correntes i_s , i_C e i_Z também são equilibradas e apresentam como valores de pico, respectivamente, 10,91 A, 9,4 A e 5,6 A. Ainda, é possível observar que a soma de i_C com i_Z é igual ao valor de i_s para cada uma das três fases (evidentemente esse resultado já era esperado, pois é consequência da “lei de Kirchhoff”).

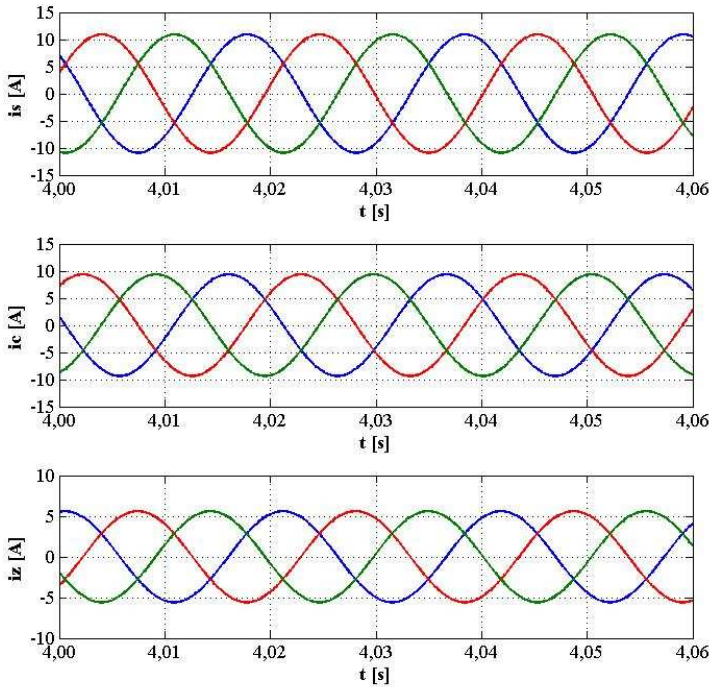


Figura 6.11 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_c , e na carga trifásica, i_z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{ca} e i_{za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{cb} e i_{zb} ; em verde, i_{sc} , i_{cc} e i_{zc} .

Na Figura 6.12 (a) observa-se a evolução de I_m ao longo do tempo. Em regime permanente a mesma se estabiliza em 6,05 A.

Na Figura 6.12 (b) tem-se o T_e ao longo do tempo. Pode-se observar que tal torque é negativo, caracterizando a operação da máquina de indução como gerador. Em regime permanente tal torque apresenta o valor de -33,4 N·m.

Na Figura 6.12 (c) é apresentada a FFT do sinal v_{as} . A amplitude e a frequência do sinal, como já mencionado anteriormente, são respectivamente da ordem de 279,9 V e 48,4 Hz.

Por fim, a Figura 6.11 (d) ilustra a potência de entrada, P_{ent} , e a potência de saída, $P_{saída}$, do sistema em função do tempo. Como o sistema é trifásico e equilibrado, em regime permanente (a partir de 3,7 s) as potências são constantes. É importante salientar que no modelo da máquina de indução apresentado não é representada a resistência associada

às perdas no material ferromagnético da máquina, R_f , bem como não são consideradas perdas mecânicas, como perdas por atrito e ventilação. Em regime permanente, obteve-se P_{ent} igual a 2623,5 W e $P_{saída}$ igual a 2350,4 W, e consequentemente um rendimento da ordem de 89,6 %.

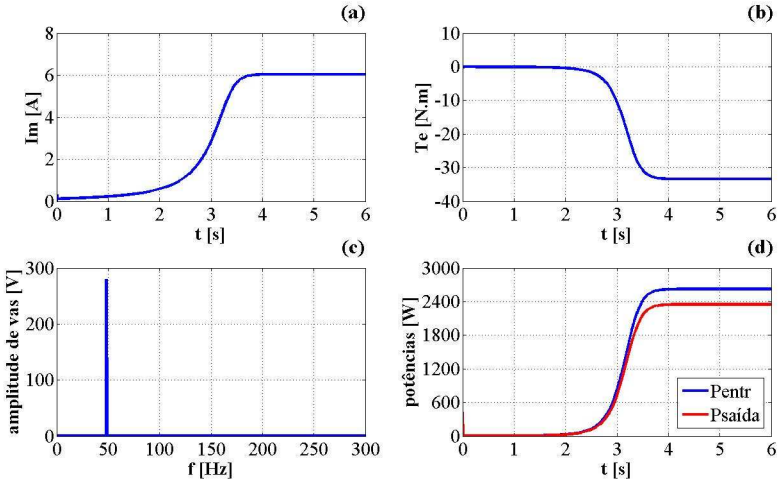


Figura 6.12 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e $P_{saída}$ em função do t .

Nas Figuras 6.13 e 6.14, observa-se o comportamento da tensão eficaz de fase, V_{eff} , em função da velocidade imposta ao GI, bem como em função dos valores de capacitância dos capacitores e da resistência de carga por fase. Considerando o banco de capacitores e a carga fixos, quanto maior a velocidade imposta ao GI, maior será o valor de V_{eff} . Por outro lado, considerando a velocidade imposta ao GI e a carga fixas, quanto maior o valor de capacitância, também maior será o valor de V_{eff} . Ainda, nas figuras, observa-se que a partir de certo valor para a resistência de carga por fase, o valor de V_{eff} praticamente se mantém constante, independente do aumento da resistência e quanto menor o valor da resistência, maior será a capacitância necessária para manter a tensão nos terminais do GI próxima da tensão em vazio. Por fim, tanto na Figura 6.13, quanto na Figura 6.14, o valor de V_{eff} para $R = 400 \Omega$ /fase é praticamente igual ao valor de V_{eff} considerando o GI operando em vazio.

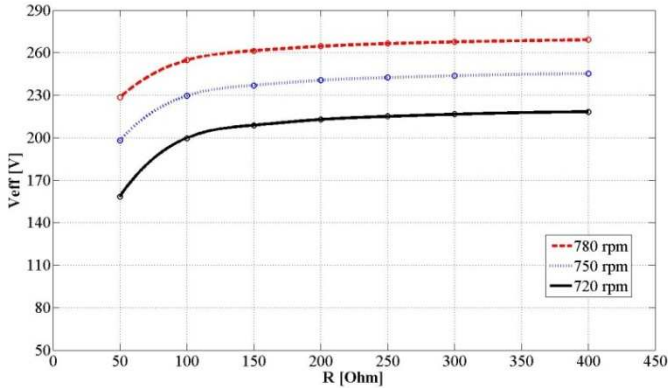


Figura 6.13 – V_{eff} em função da resistência de carga por fase para diferentes velocidades impostas ao GI, com $C_a=C_b=C_c=110\ \mu\text{F}$.

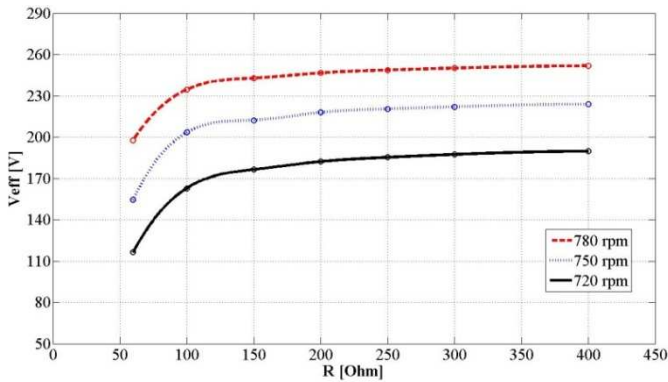


Figura 6.14 – V_{eff} em função da resistência de carga por fase para diferentes velocidades impostas ao GI, com $C_a=C_b=C_c=100\ \mu\text{F}$.

Com relação à frequência da tensão eficaz de fase, V_{eff} , considerando um banco de capacitores equilibrado e com valores fixo de capacitância, a mesma varia basicamente em função da velocidade imposta ao GI (embora a impedância de carga também seja uma variável a ser considerada, porém de menor influência para o valor final da frequência). Ainda, o valor desta frequência é um pouco abaixo do valor associado à rotação imposta ao gerador. Neste trabalho obteve-se frequências entre 48 Hz e 49 Hz para a V_{eff} , considerando o GI operando a 750 rpm; destacando que a máquina simulada apresenta 8 pólos, logo, tem-se uma frequência síncrona de 50 Hz associada a rotação de 750 rpm.

6.2.2 Carga RL, trifásica e equilibrada

Neste item, considerou-se uma carga RL, trifásica e equilibrada, sendo o valor da resistência de carga igual a $50 \, \Omega$ por fase (mesmo valor estipulado no item anterior) e da indutância por fase igual a $30 \, \text{mH}$. Fixou-se a máquina de indução operando a $750 \, \text{rpm}$.

Calculando a capacitância mínima necessária para que o processo de auto-excitação pudesse ocorrer, obteve-se o valor de $105 \, \mu\text{F}$ (neste caso, teríamos uma frequência de $48,5 \, \text{Hz}$, pois $k_a = 0,97$ para $C_{\min} = 105 \, \mu\text{F}$). Logo, fixou-se um valor de capacitância igual a $120 \, \mu\text{F}$ para todos os capacitores do banco de capacitores.

Ao inserir uma indutância em série com a resistência de carga, observa-se que o valor de C_{\min} aumenta, e ainda, quando mais indutiva for a carga RL, maior será o valor de C_{\min} requerido para que ocorra o processo de auto-excitação (ver Figura 6.15).

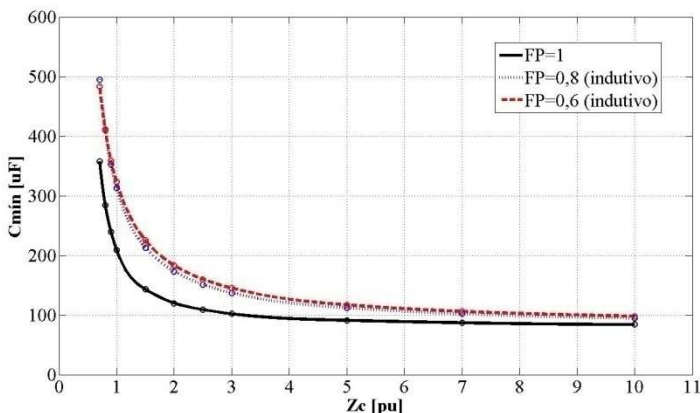


Figura 6.15 – C_{\min} em função de Z_c para cargas com diferentes FP (impedância de base: $Z_b = 16,8 \, \Omega$).

Os resultados obtidos, em regime permanente, são semelhantes aos apresentados no item anterior (correntes e tensões equilibradas) e são apresentados a seguir.

Na Figura 6.16, o valor de pico de v_s , v_C e v_Z é da ordem de $275,5 \, \text{V}$, e a frequência de tais tensões é igual a $48,5 \, \text{Hz}$.

Já na Figura 6.17, os valores de pico de i_s , i_C e i_Z são, respectivamente, da ordem de $10,54 \, \text{A}$, $10,07 \, \text{A}$ e $5,42 \, \text{A}$.

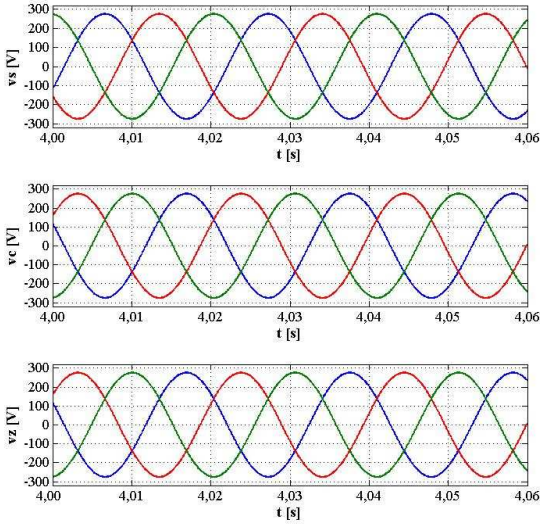


Figura 6.16 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_c , e na carga trifásica, v_z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc} .

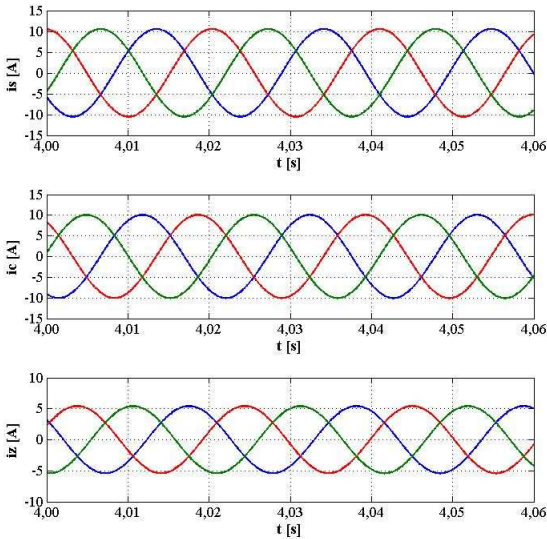


Figura 6.17 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_c , e na carga trifásica, i_z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{Ca} e i_{Za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{Cb} e i_{Zb} ; em verde, i_{sc} , i_{Cc} e i_{Zc} .

A Figura 6.18 ilustra os resultados obtidos para as mesmas variáveis apresentadas na Figura 6.12. É importante destacar que neste item, considerando uma carga RL equilibrada, o valor dos capacitores é da ordem de 120 μF e uma indutância de 30 mH foi inserida em série com a resistência de 50 Ω . No item anterior, o valor dos capacitores era da ordem de 110 μF e a carga era puramente resistiva e da ordem de 50 Ω .

Na Figura 6.18 (a) observa-se a evolução da I_m ao longo do tempo. Em regime permanente a mesma se estabiliza em 5,91 A (no item anterior, 6,05 A).

Na Figura 6.18 (b) tem-se o T_e ao longo do tempo. Em regime permanente tal torque apresenta o valor de -31,5 N·m (no item anterior, -33,4 N·m).

Já na Figura 6.18 (c) é apresentada a FFT do sinal v_{as} . A amplitude e a frequência do sinal, como já mencionado anteriormente, são respectivamente da ordem de 275,5 V e 48,5 Hz (no item anterior, 279,9 V e 48,4 Hz).

Por fim, a Figura 6.18 (d) ilustra a P_{ent} e $P_{saída}$ do sistema em função do tempo. Em regime permanente, obteve-se P_{ent} igual a 2474,0 W (no item anterior, 2623,5 W) e $P_{saída}$ igual a 2219,4 W (no item anterior, 2350,4 W), e consequentemente um rendimento da ordem de 89,7 % (no item anterior, 89,6 %).

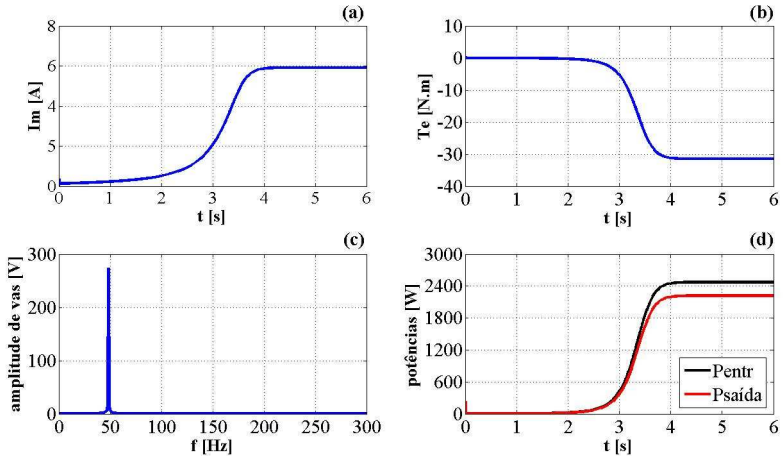


Figura 6.18 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e $P_{saída}$ em função do t .

Tanto os resultados apresentados no item anterior quanto neste item são extremamente semelhantes, visto que aumentou-se em apenas 10 μF a capacitância dos capacitores e a carga RL, apresenta em 48,5 Hz, uma impedância bem próxima de 50 Ω e com fator de deslocamento próximo ao unitário, para ser mais exato, apresenta impedância da ordem de 50,88 Ω e FP da ordem de 0,98.

Logo, realizou-se uma simulação considerando uma carga RL com impedância da ordem de 50 Ω e FP da ordem de 0,8 (considerando uma frequência de 48,5 Hz), ou seja, com $R = 40 \Omega$ e $L = 98,5 \text{ mH}$. Neste caso, o valor de C_{\min} é da ordem de 138 μF , logo, estipulou-se como sendo da ordem de 150 μF a capacitância dos capacitores. Os resultados obtidos, em regime permanente, para os casos analisados, estão presentes na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Resultados obtidos para o GI conectado em estrela com 3 fios.

	caso 1 $R = 50 \Omega$ $L = 0$	caso 2 $R = 50 \Omega$ $L = 30 \text{ mH}$	caso 3 $R = 40 \Omega$ $L = 98,5 \text{ mH}$
ω_{rotor} [rpm]	750	750	750
C_{\min} [μF]	94	105	138
$C_a = C_b = C_c$ [μF]	110	120	150
f [Hz]	48,4	48,5	48,7
V_{eff} [V]	197,9	194,8	214,7
I_m [A]	6,05	5,91	6,84
I_{sef} [A]	7,71	7,44	8,06
I_{Zef} [A]	3,96	3,83	4,29
I_{Cef} [A]	6,62	7,12	9,83
T_e [N'm]	-33,4	-31,5	-31,6
P_{ent} [W]	2623,5	2474,0	2476,1
$P_{\text{saída}}$ [W]	2350,4	2219,4	2204,8
η [%]	89,6	89,7	89,0

O valor de V_{eff} para o terceiro caso foi maior do que o valor encontrado para os dois primeiros casos devido ao uso de capacitores de

150 μF (caso fossem usados capacitores de 145 μF , teríamos $V_{\text{eff}} = 200,8 \text{ V}$, conforme simulação efetuada). Logo, I_{efz} atingiu um valor maior possibilitando que a potência de saída permanecesse praticamente igual a do segundo caso, embora a resistência fosse de 40 Ω (menor que a resistência de 50 Ω utilizada no segundo caso); lembrando que a potência de saída na carga pode ser expressa por $3 \cdot (I_{\text{efz}})^2 \cdot R$, uma vez que trata-se de um circuito trifásico equilibrado.

6.2.3 Carga RL, trifásica e desequilibrada

Neste item, considerou-se uma carga RL, trifásica e desequilibrada, com os seguintes valores assumidos: $R_a = 50 \Omega$, $R_b = 100 \Omega$, $R_c = 200 \Omega$, $L_a = 70 \text{ mH}$, $L_b = 50 \text{ mH}$ e $L_c = 150 \text{ mH}$.

Para o cálculo de $C_{\text{mín}}$ será adotada a seguinte metodologia: calcula-se o valor de $C_{\text{mín}}$ considerando uma carga trifásica equilibrada assumindo os valores de R_a e L_a em todas as fases, posteriormente os valores de R_b e L_b e por fim, os valores de R_c e L_c . O maior valor de $C_{\text{mín}}$ obtido será considerado a menor capacitância requerida para que o processo de auto-excitação ocorra.

Desta análise, obtém-se:

- $C_{\text{mín}} = 123 \mu\text{F}$ para $R = 50 \Omega$ e $L = 70 \text{ mH}$;
- $C_{\text{mín}} = 94 \mu\text{F}$ para $R = 100 \Omega$ e $L = 50 \text{ mH}$;
- $C_{\text{mín}} = 87 \mu\text{F}$ para $R = 200 \Omega$ e $L = 150 \text{ mH}$.

Logo, fixou-se um valor de capacitância igual a 130 μF para todos os capacitores do banco de capacitores.

É importante destacar que simulações considerando capacitâncias de 70 μF e 100 μF foram realizadas e em ambos os casos o processo de auto-excitação não ocorreu. Logo, a metodologia adotada para estipular a capacitância dos capacitores, neste caso, mostrou-se apropriada.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Na Figura 6.19, os valores de pico de v_{as} , v_{bs} e v_{cs} , são respectivamente da ordem de 343,2 V, 344,5 V e 353,3 V, e a frequência de tais tensões é igual a 49,1 Hz. Como isto, percebe-se que há um pequeno desequilíbrio (não muito acentuado) entre as tensões no estator do GI.

Já as tensões na carga, são exatamente iguais as tensões dos capacitores, devido à ligação em paralelo entre carga e banco de capacitores. Logo, $v_{Ca} = v_{Za}$, $v_{Cb} = v_{Zb}$ e $v_{Cc} = v_{Zc}$ sendo a frequência de tais tensões

da ordem de 49,1 Hz com valores de pico, respectivamente, iguais a 367,4 V, 302,7 V e 374,5 V.

Com isto, percebe-se que o desequilíbrio da carga acarreta em tensões desequilibradas tanto no estator do GI, quanto na própria carga e no banco de capacitores.

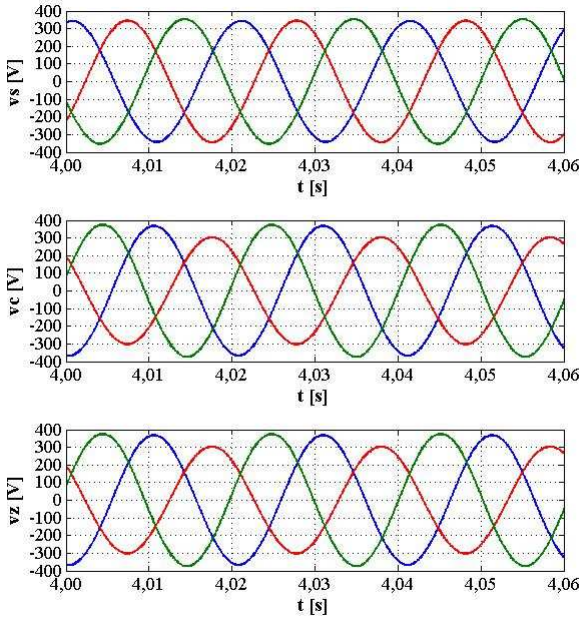


Figura 6.19 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_c , e na carga trifásica, v_z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc} .

Já na Figura 6.20, todas as correntes apresentam frequência da ordem de 49,1 Hz. Os valores de pico de i_{sa} , i_{sb} e i_{sc} são, respectivamente, da ordem de 13,61 A, 11,95 A e 14,75 A; os de i_{Ca} , i_{Cb} e i_{Cc} , 14,70 A, 12,05 A e 15,07 A; e os de i_{Za} , i_{Zb} e i_{Zc} , 6,74 A, 2,99 A e 1,82 A.

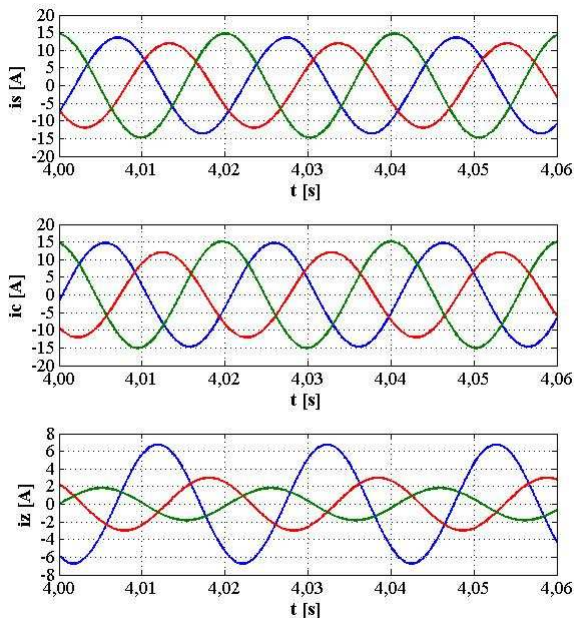


Figura 6.20 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_c , e na carga trifásica, i_z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{ca} e i_{za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{cb} e i_{zb} ; em verde, i_{sc} , i_{cc} e i_{zc} .

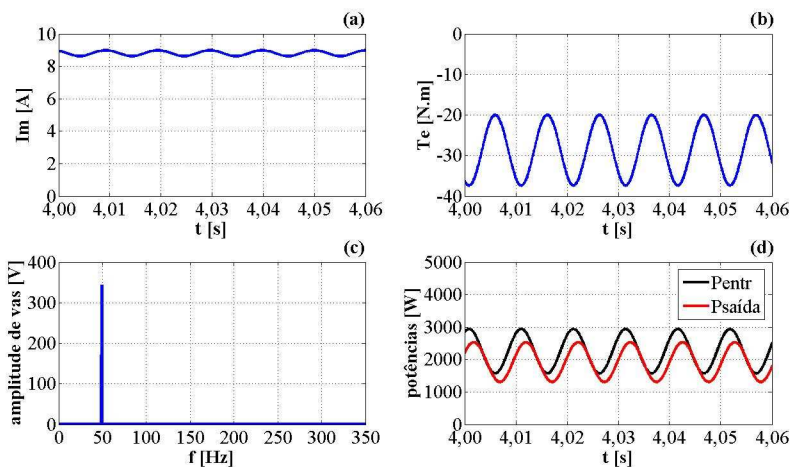


Figura 6.21 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e P_{saida} em função do t .

Na Figura 6.21 (a) observa-se, em regime permanente, I_m ao longo do tempo. O valor de I_m oscila de forma sinusoidal (com frequência da ordem de 98,2 Hz) entre 8,62 e 8,98 A, apresentando um valor médio da ordem de 8,80 A.

Na Figura 6.21 (b) tem-se o T_e também em regime permanente. O mesmo oscila de forma sinusoidal (com frequência da ordem de 98,2 Hz) entre -20,0 e -37,4 N·m.

Já na Figura 6.21 (c) é apresentada a FFT do sinal v_{as} . A amplitude e a frequência do sinal, como já mencionado anteriormente, são respectivamente da ordem de 343,2 V e 49,1 Hz.

Por fim, a Figura 6.21 (d) ilustra a P_{ent} e $P_{saída}$ do sistema em função do tempo e em regime permanente. As mesmas variam de forma sinusoidal com frequência da ordem de 98,2 Hz. Em termos de potência, é importante avaliar os valores médios assumidos pelas grandezas P_{ent} e $P_{saída}$, para então calcular o rendimento do sistema. Neste caso, obteve-se como valores médios para P_{ent} e $P_{saída}$, respectivamente, 2254,1 W e 1916,8 W, e consequentemente um rendimento da ordem de 85,04 %.

Um resultado importante a ser analisado é a frequência associada à corrente de magnetização eficaz, sendo tal frequência da ordem de 98,2 Hz (o dobro da frequência das tensões no estator do GI).

Matematicamente tem-se que:

$$I_m = \sqrt{(i_{qs} + i_{qr})^2 + (i_{ds} + i_{dr})^2} \quad (6.2).$$

Considerando o banco de capacitores equilibrado e também a carga, tem-se que em regime permanente senoidal $(i_{qs} + i_{qr})^2 + (i_{ds} + i_{dr})^2$ assume um valor constante. Já para cargas desequilibradas, isso não ocorre.

Supondo um sistema $dq0$ estacionário em relação ao estator e assumindo que:

$$i_{qs} + i_{qr} = 2 \cdot \cos(2\pi \cdot 50 \cdot t) \rightarrow f = 50 \text{ Hz} \quad (6.3),$$

$$i_{dr} + i_{ds} = \cos(2\pi \cdot 50 \cdot t + \pi/2) \rightarrow f = 50 \text{ Hz} \quad (6.4),$$

tem-se que:

$$I_m = \sqrt{(i_{qs} + i_{qr})^2 + (i_{ds} + i_{dr})^2} = \sqrt{4 \cdot \cos^2(2\pi \cdot 50 \cdot t) + \cos^2(2\pi \cdot 50 \cdot t + \pi/2)} \quad (6.5).$$

O termo $\pi/2$ na equação (6.4) simboliza o defasamento de 90° existente entre as correntes em quadratura e as correntes em eixo direto.

Ainda, pode-se observar pela Figura 6.22 que o sinal representado pela equação (6.5) não apresenta um valor constante ao longo do tempo, sendo a frequência deste sinal da ordem de 100 Hz, ou seja, o dobro de 50 Hz.

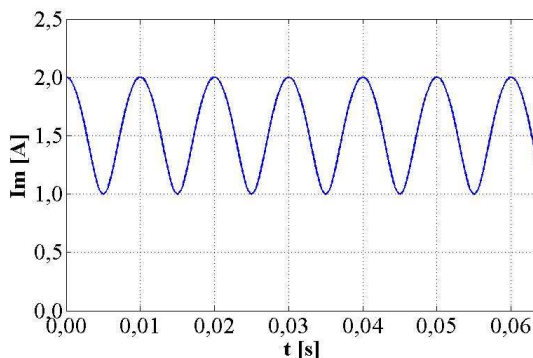


Figura 6.22 – Sinal resultante da equação (6.5).

6.3 GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (gerador com 4 fios)

Neste item, analisou-se a configuração apresentada pela Figura 6.23 (que é idêntica a Figura 4.2). Os resultados para esta configuração, considerando os casos equilibrados apresentados no item 6.2 deste trabalho, são os mesmos obtidos e já apresentados no item citado. Logo, serão aqui apresentados somente resultados para uma carga RL desequilibrada idêntica a utilizada no item 6.2.3. Com isto, poderá ser realizado um comparativo entre o gerador a 3 fios e o gerador a 4 fios, quando operando com carga desequilibrada.

Sendo assim, a capacitância dos capacitores do banco será fixada novamente em $130 \mu\text{F}$.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

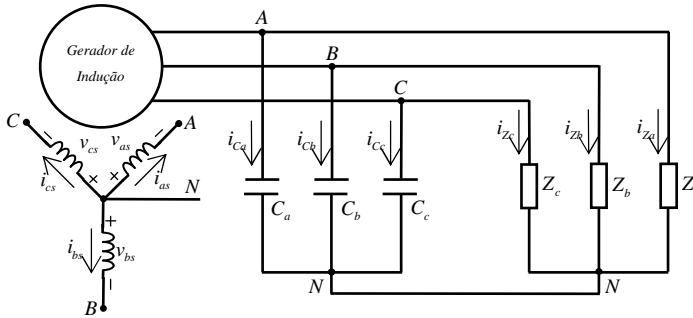


Figura 6.23 – GI com carga e banco de capacitores conectados em estrela (terminais do gerador com 4 fios).

Na Figura 6.24, tem-se $v_{as}=v_{Ca}=v_{Za}$, $v_{bs}=v_{Cb}=v_{Zb}$ e $v_{cs}=v_{Cc}=v_{Zc}$, com os valores de pico das tensões respectivamente da ordem de 336,1 V, 346,2 V e 351,1 V e a frequência de tais tensões igual a 49,1 Hz. Com isto, percebe-se que há um pequeno desequilíbrio (não muito acentuado) entre as tensões.

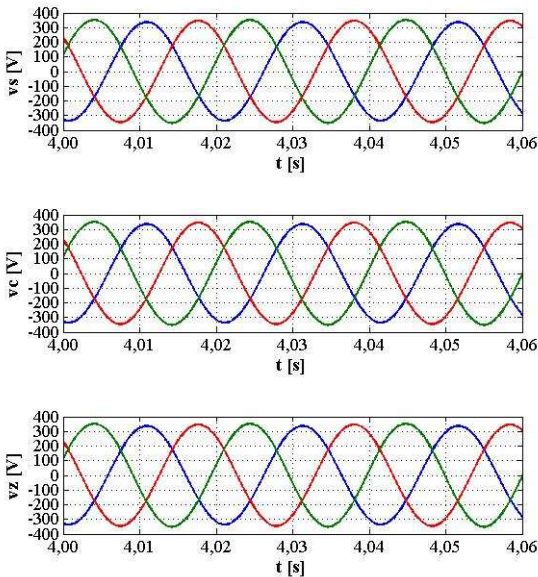


Figura 6.24 – Tensões no estator do GI, v_s , no banco de capacitores, v_c , e na carga trifásica, v_z , em regime permanente. Em azul, v_{sa} , v_{Ca} e v_{Za} ; em vermelho, v_{sb} , v_{Cb} e v_{Zb} ; em verde, v_{sc} , v_{Cc} e v_{Zc} .

Já na Figura 6.25, todas as correntes apresentam frequência da ordem de 49,1 Hz. Os valores de pico de i_{sa} , i_{sb} e i_{sc} são, respectivamente, da ordem de 12,44 A, 13,72 A e 13,86 A; os de i_{Ca} , i_{Cb} e i_{Cc} , 13,49 A, 13,82 A e 14,15 A; e os de i_{za} , i_{zb} e i_{zc} , 6,17 A, 3,42 A e 1,71 A.

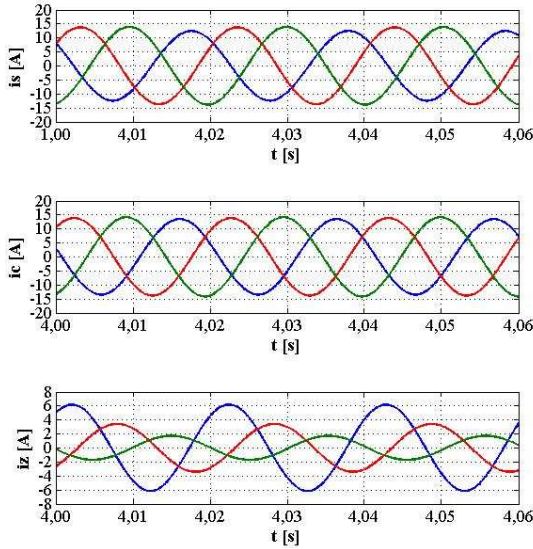


Figura 6.25 – Correntes no estator do GI, i_s , no banco de capacitores, i_c , e na carga trifásica, i_z , em regime permanente. Em azul, i_{sa} , i_{Ca} e i_{za} ; em vermelho, i_{sb} , i_{Cb} e i_{zb} ; em verde, i_{sc} , i_{Cc} e i_{zc} .

Na Figura 6.26 (a) o valor de I_m , em regime permanente, oscila de forma sinusoidal (com frequência da ordem de 98,2 Hz) entre 8,62 e 8,98 A, apresentando um valor médio da ordem de 8,80 A.

Na Figura 6.26 (b) tem-se o T_e também em regime permanente. O mesmo oscila de forma sinusoidal (com frequência da ordem de 98,2 Hz) entre -20,2 e -34,8 N·m.

Já na Figura 6.26 (c) é apresentada a FFT do sinal v_{as} . A amplitude e a frequência do sinal, como já mencionado anteriormente, são respectivamente da ordem de 336,1 V e 49,1 Hz.

Por fim, a Figura 6.26 (d) ilustra a P_{ent} e $P_{saída}$ do sistema em função do tempo e em regime permanente. As mesmas variam de forma sinusoidal com frequência da ordem de 98,2 Hz. Os valores médios para P_{ent} e $P_{saída}$ são respectivamente 2158,7 W e 1829,8 W, e consequentemente o rendimento do sistema é da ordem de 84,76 %.

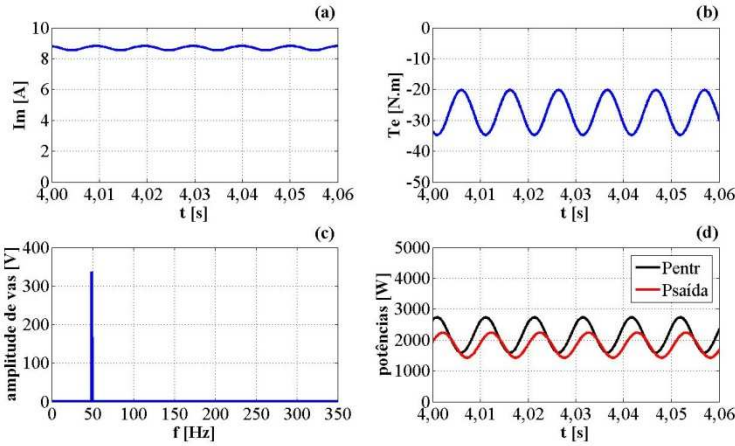


Figura 6.26 – (a) I_m em função do t ; (b) T_e em função do t ; (c) FFT do sinal v_{as} ; (d) P_{ent} e P_{saida} em função do t .

6.4 GI com carga e banco de capacitores conectados em delta

Neste item, tem-se uma configuração conforme a Figura 6.27 (que é idêntica a Figura 4.3) e serão apresentados resultados para uma carga RL desequilibrada.

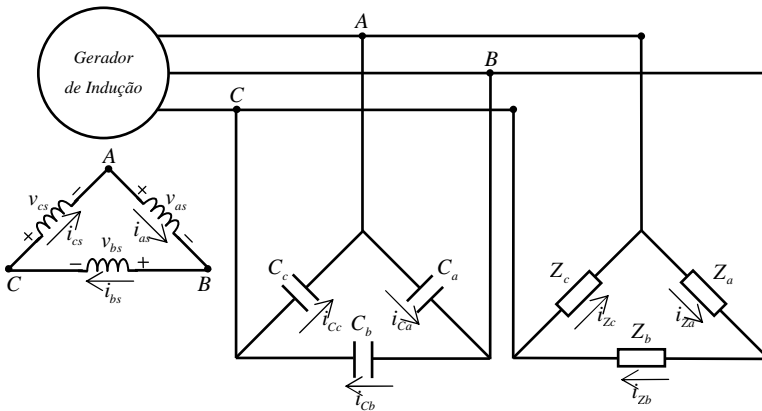


Figura 6.27 – GI com carga e banco de capacitores conectados em delta.

Os valores fixados para a carga são os mesmos apresentados no item 6.2.3 deste trabalho, porém com a carga conectada em delta, ou seja: $R_a = 50 \, \Omega$, $R_b = 100 \, \Omega$, $R_c = 200 \, \Omega$, $L_a = 70 \, \text{mH}$, $L_b = 50 \, \text{mH}$ e $L_c = 150 \, \text{mH}$.

Fixou-se a capacitância igual a $130 \, \mu\text{F}$ para todos os capacitores do banco de capacitores.

Os gráficos obtidos para este item são semelhantes aos apresentados até o momento. Logo os principais resultados obtidos neste item estão apresentados na Tabela 6.2. A mesma ilustra os resultados obtidos considerando a carga RL desequilibrada, para o GI com 3 e 4 fios, ligado em estrela, e para o GI conectado em delta.

Tabela 6.2 – Resultados obtidos para as diferentes configurações estudadas, considerando uma carga RL desequilibrada.

	caso 1 GI com 3 fios, ligado em estrela	caso 2 GI com 4 fios, ligado em estrela	caso 3 GI ligado em delta
ω_{rotor} [rpm]	750	750	750
$C_a=C_b=C_c$ [μF]	130	130	130
f [Hz]	49,1	49,1	49,1
V_{efZa} [V]	259,8	237,7	242,0
V_{efZb} [V]	214,0	244,8	243,2
V_{efZc} [V]	264,8	248,3	248,3
T_{e_m} [N.m]	-28,7	-27,5	-27,8
P_{ent_m} [W]	2254,1	2158,7	2184,1
$P_{saída_m}$ [W]	1916,8	1829,8	1857,7
η [%]	85,04	84,76	85,06

Pela Tabela 6.2 observa-se que para todos os casos comparados, as potências médias de entrada e saída não variam consideravelmente entre um caso e outro, bem como o rendimento. No entanto, observa-se que quando o GI está conectado em delta ou em estrela com 4 fios, as tensões na carga apresentam praticamente o mesmo valor eficaz, diferentemente de quando o GI está conectado em estrela com 3 fios. Ainda, a frequência em todos os casos é a mesma.

Observação: a tensão nominal eficaz de fase no estator do GI analisado é da ordem de 230,0 V. Em algumas análises até o momento efetuadas, obtiveram-se valores um pouco superiores a 230,0 V para tensões no estator. Uma forma de diminuir tais tensões seria reduzir a velocidade imposta ao GI (com este procedimento, a frequência do sistema seria diretamente afetada, diminuindo-a) ou ainda, diminuir a capacitância dos capacitores. Uma combinação entre ambas as formas, evidentemente, também é possível.

6.5 Configurações monofásicas

Neste item serão analisados alguns diferentes tipos de configurações monofásicas. A carga monofásica será composta por uma resistência de $30\ \Omega$ em série com uma indutância de 60 mH, quando o GI estiver conectado em delta. Já para o GI conectado em estrela, a carga será composta por uma resistência de $90\ \Omega$ em série com uma indutância de 180 mH. Com isto, espera-se obter resultados semelhantes para as duas configurações apresentadas na Figura 6.28 (que são iguais as apresentadas pela Figura 5.3), uma vez que a capacitância assumida para o capacitor na configuração com o GI conectado em estrela será o triplo da utilizada para o GI conectado em delta [11].

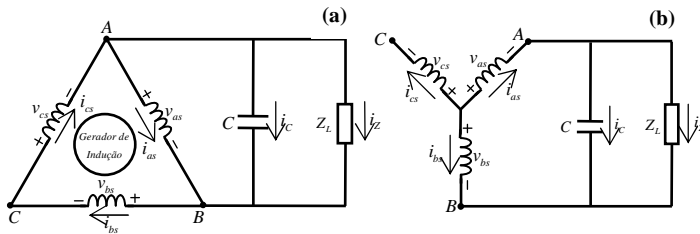


Figura 6.28 – Configurações monofásicas: (a) GI conectado em delta; (b) GI conectado em estrela.

As figuras 6.29 e 6.30 ilustram C_{min} em função de diferentes cargas, considerando o GI operando a 750 rpm. Ainda, é possível observar pelas Figuras 6.29 e 6.30 que se a impedância de carga com o GI conectado em estrela for o triplo da impedância de carga com o GI conectado em delta, necessita-se na ligação em estrela um valor de C_{min} três vezes menor que o valor necessitado para a ligação delta.

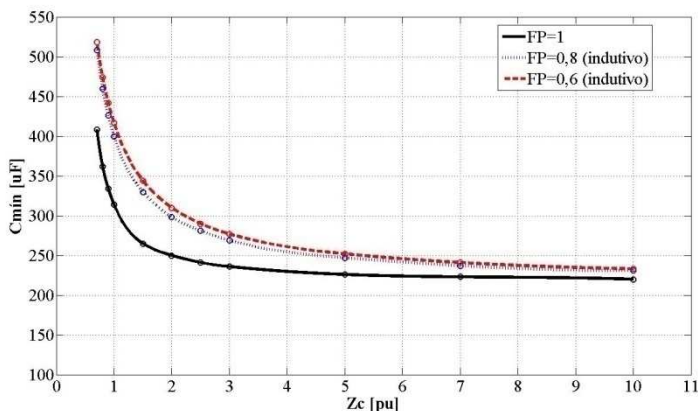


Figura 6.29 – C_{min} em função de Z_c para cargas com diferentes FP, considerando o GI conectado em delta (impedância de base: $Z_b = 16,8 \Omega$).

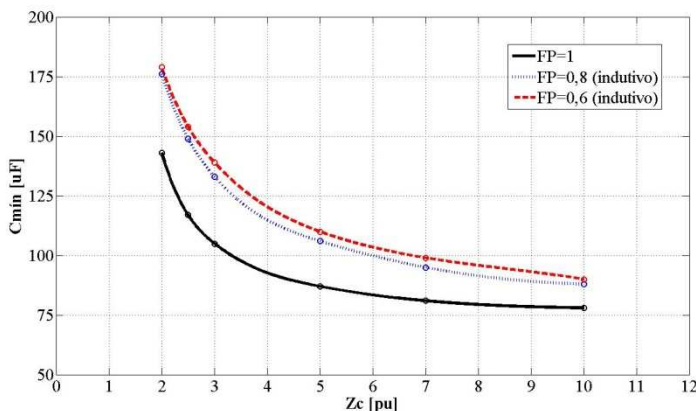


Figura 6.30 – C_{min} em função de Z_c para cargas com diferentes FP, considerando o GI conectado em estrela (impedância de base: $Z_b = 16,8 \Omega$).

Para a carga estipulada, calculando a mínima capacitância necessária para que o processo de auto-excitação possa ocorrer, obteve-se o valor de $290 \mu F$ considerando o GI conectado em delta, e $97 \mu F$, considerando o GI conectado em estrela. Logo, fixou-se um valor de capacitância igual a $330 \mu F$ para o GI conectado em delta e $110 \mu F$ para o GI conectado em estrela.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Na Figura 6.31, os valores de pico de v_z e i_z são respectivamente, 317,8 V e 9,03 A.

Já na Figura 6.32, os valores de pico de v_{as} , v_{bs} e v_{cs} são respectivamente, 317,8 V, 244,6 V e 297,9 V; e os de i_{as} , i_{bs} e i_{cs} , 19,21 A, 9,60 A e 9,60 A. É importante destacar que $i_{bs}=i_{cs}$ (ver Figura 6.28 (a)), logo, na Figura 6.32, há somente duas formas de onda, uma vez que a corrente i_{bs} se encontra superposta à corrente i_{cs} .

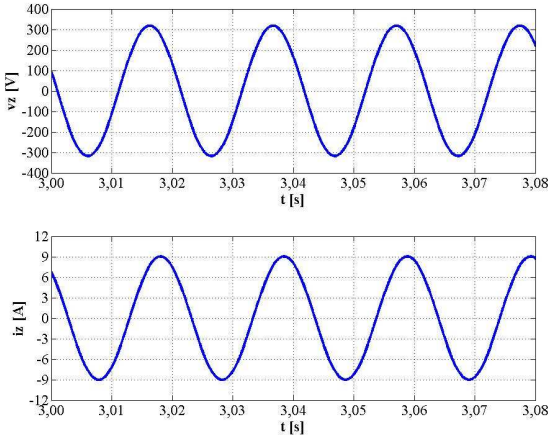


Figura 6.31 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_z e i_z , considerando o GI conectado em delta.

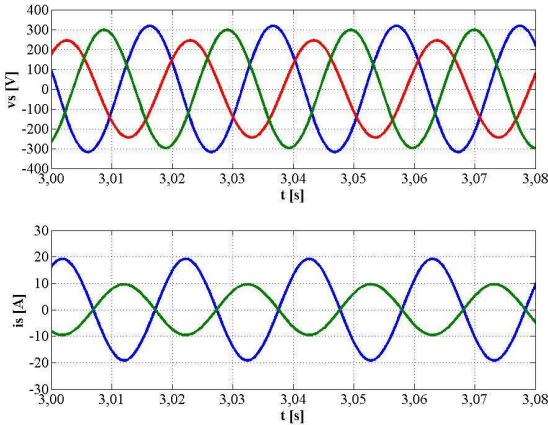


Figura 6.32 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s . Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc} .

A figura 6.33 apresenta a perda de excitação que ocorre nos terminais do GI quando o capacitor de excitação decai para um valor abaixo do valor mínimo requerido ($290 \mu\text{F}$), considerando uma configuração conforme a Figura 6.28 (a). No caso, o mesmo decai de $330 \mu\text{F}$ para $250 \mu\text{F}$ em $t = 3,0 \text{ s}$.

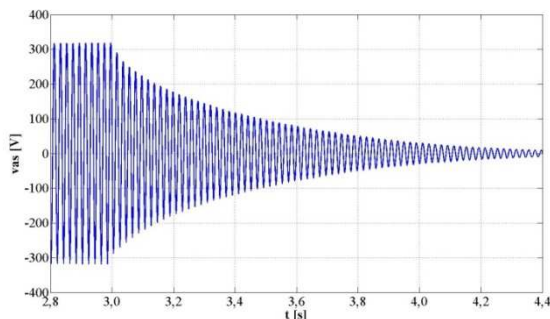


Figura 6.33 – Perda da excitação do GI quando o capacitor decai para um valor abaixo do valor mínimo requerido.

Na Figura 6.34, os valores de pico de v_z e i_z são respectivamente, $550,4 \text{ V}$ e $5,21 \text{ A}$.

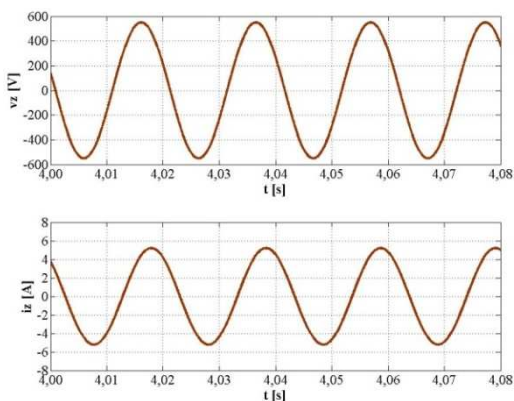


Figura 6.34 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_z e i_z , considerando o GI conectado em estrela.

Já na Figura 6.35, os valores de pico de v_{as} , v_{bs} e v_{cs} são respectivamente, $326,1 \text{ V}$, $279,8 \text{ V}$ e $254,6 \text{ V}$; e os de i_{as} , i_{bs} e i_{cs} , $16,63 \text{ A}$, $16,63 \text{ A}$ e 0 A .

Na Figura 6.28 (b), observa-se que $i_{bs} = -i_{as}$ e $i_{cs} = 0$, e estas duas observações são confirmadas pela Figura 6.35.

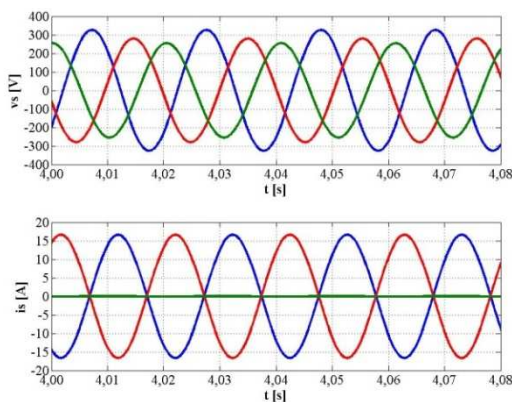


Figura 6.35 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s . Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} e i_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc} .

Os principais resultados obtidos, para as duas configurações apresentadas na Figura 6.28 são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Resultados obtidos para as duas configurações monofásicas ilustradas na Figura 6.28.

	caso 1 GI conectado em delta	caso 2 GI conectado em estrela
ω_{rotor} [rpm]	750	750
C [μ F]	330	110
f [Hz]	49,0	49,0
V_t [V]	224,7	389,2
I_Z [A]	6,39	3,68
V_C [V]	224,7	389,2
I_C [A]	23,00	13,28
T_{e-m} [N·m]	-21,7	-21,7
P_{ent-m} [W]	1705,9	1705,5
$P_{saída-m}$ [W]	1223,1	1222,7
η [%]	71,70	71,69

Pela tabela 6.3 observa-se que o valor da tensão eficaz nos terminais da carga, V_t , para o caso do GI conectado em estrela, é $\sqrt{3}$ vezes maior que o valor assumido para o caso do GI conectado em delta. Já o valor de I_Z é $\sqrt{3}$ menor quando o GI está conectado em estrela. Ainda, as potências em ambos os casos são praticamente as mesmas. Estes resultados confirmam o que é descrito em [11].

6.5.1 Configurações do tipo Steinmetz

As configurações do tipo Steinmetz (ver Figura 6.36) são comumente apresentadas em artigos que analisam o emprego do GITAE alimentando cargas monofásicas. Logo, as mesmas serão analisadas considerando a carga monofásica com resistência de $30\ \Omega$ em série com uma indutância de $60\ \text{mH}$. O valor de capacitância fixado para o capacitor, assim como os valores da carga, será o mesmo valor assumido no item anterior quando se analisou o GI conectado em delta, ou seja, $330\ \mu\text{F}$.

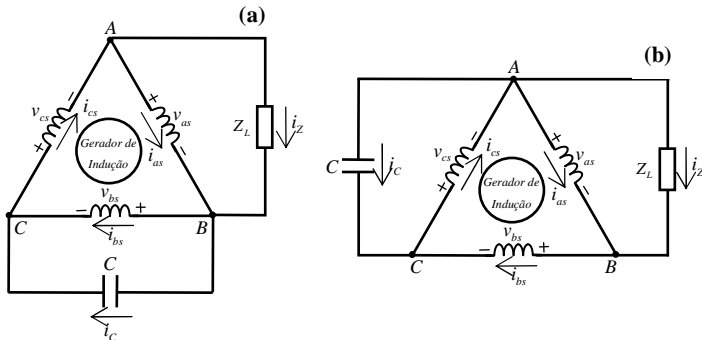


Figura 6.36 – Configurações monofásicas: (a) Steinmetz I; (b) Steinmetz II.

Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Na Figura 6.37, os valores de pico de v_Z e i_Z são respectivamente, $325,6\ \text{V}$ e $9,20\ \text{A}$.

Já na Figura 6.38, os valores de pico de v_{AS} , v_{BS} e v_{CS} são respectivamente, $325,6\ \text{V}$, $386,5\ \text{V}$ e $307,6\ \text{V}$; e os de i_{AS} , i_{BS} e i_{CS} , $7,35\ \text{A}$, $23,69\ \text{A}$ e $16,39\ \text{A}$.

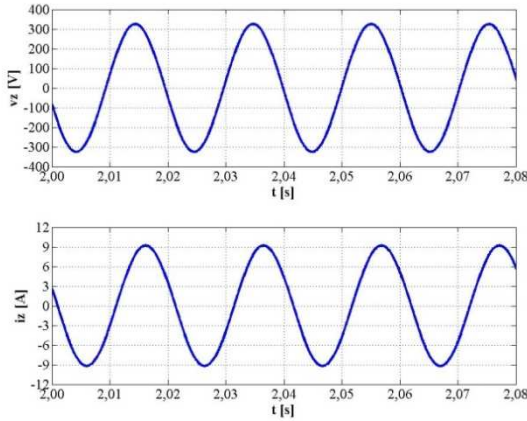


Figura 6.37 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_z e i_z , considerando a configuração Steinmetz I.

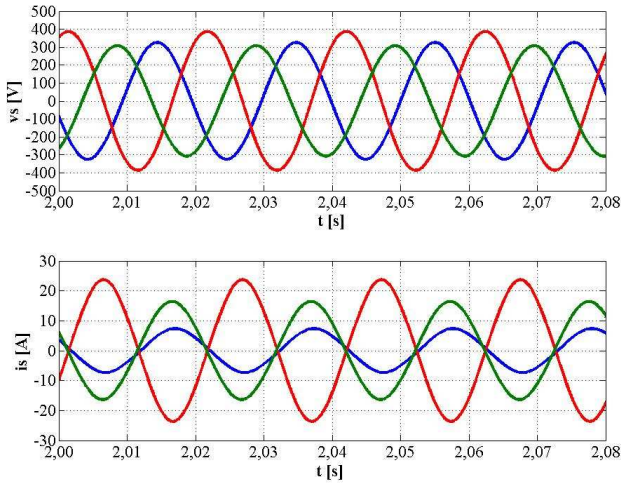


Figura 6.38 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s , considerando a configuração Steinmetz I. Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} e i_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc} .

Na Figura 6.39, os valores de pico de v_z e i_z são respectivamente, 278,9 V e 7,91 A.

Já na Figura 6.40, os valores de pico de v_{as} , v_{bs} e v_{cs} são respectivamente, 278,9 V, 341,1 V e 399,1 V; e os de i_{as} , i_{bs} e i_{cs} , 16,71 A, 12,93 A e 12,95 A.

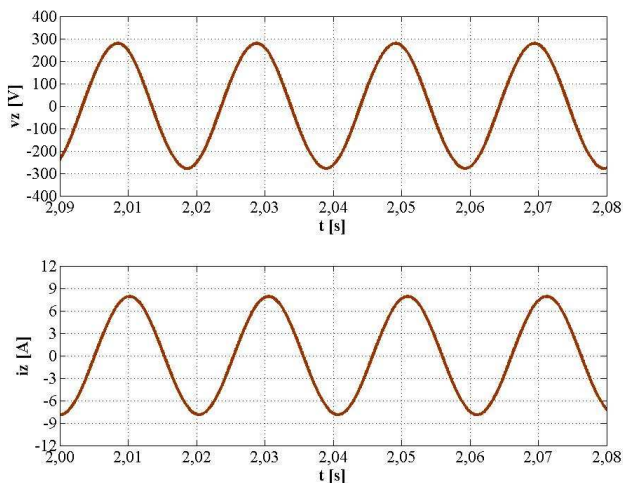


Figura 6.39 – Tensão e corrente na carga monofásica, v_z e i_z , considerando a configuração Steinmetz II.

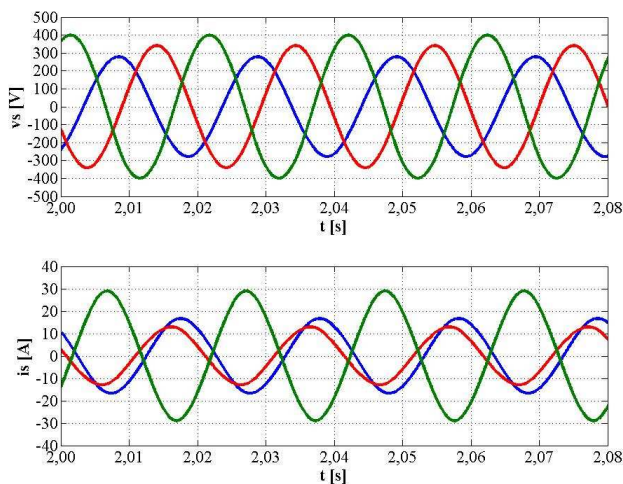


Figura 6.40 – Tensões no estator do GI, v_s , e correntes no estator do GI, i_s , considerando a configuração Steinmetz II. Em azul, v_{sa} e i_{sa} ; em vermelho, v_{sb} e i_{sb} ; em verde, v_{sc} e i_{sc} .

De forma geral, os principais resultados obtidos para as duas configurações do tipo Steinmetz são apresentados pela Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Resultados obtidos para as duas configurações monofásicas do tipo Steinmetz.

	caso 1 Steinmetz I	caso 2 Steinmetz II
ω_{rotor} [rpm]	750	750
C [μ F]	330	110
f [Hz]	49,2	49,2
V_t [V]	230,2	197,2
I_Z [A]	6,51	5,59
V_C [V]	273,3	282,2
I_C [A]	28,33	29,45
T_{e_m} [N·m]	-25,38	-26,35
P_{ent_m} [W]	1993,6	2069,2
$P_{saída_m}$ [W]	1269,0	937,6
η [%]	63,65	45,31

Pela tabela 6.4 observa-se que a configuração do tipo Steinmetz I apresentou melhor desempenho em termos de potência de saída e rendimento, quando comparada com a do tipo Steinmetz II. Observa-se, ainda, que a tensão nos terminais do estator é maior na fase na qual está conectado o capacitor (em ambos os tipos de configurações). Logo, em aplicações práticas, o valor da capacitância de excitação deve ser escolhido de forma apropriada, de forma a não ocorrer tensões excessivas no estator do GI. Estas mesmas conclusões também são descritas em [1].

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

7.1 Conclusões gerais

Buscou-se com este trabalho apresentar um estudo e análise do GITAE autônomo, considerando diferentes configurações para o sistema composto pelo GI, banco de capacitores e carga.

Partindo do modelo do GI e fazendo uso da teoria dos eixos de referência, pôde-se equacionar sistemas lineares de equações diferenciais e assim resolvê-los passo a passo no tempo. Para a resolução dos sistemas, considerou-se o efeito da indutância de magnetização da máquina de indução.

Utilizou-se o *software* MATLAB para elaboração do programa que viesse a resolver tais sistemas e foi preterido o método Runge-Kutta de 4ª ordem para a resolução dos mesmos. Tal método é simples e eficiente, e pode ser facilmente implementado computacionalmente.

A operação do GITAE está diretamente relacionada com a indutância de magnetização do GI (e a outros fatores, tais como, velocidade imposta ao eixo do GI e a capacitância dos capacitores). Logo, procurou-se descrever a forma com que podemos relacionar a mesma em função da corrente de magnetização eficaz.

Para que ocorra o processo de auto-excitação do GI é necessária uma escolha apropriada para os valores das capacitâncias de excitação. Logo, é apresentado um método comumente utilizado para a determinação da capacitância mínima requerida. Tal método pode ser empregado tanto considerando o GITAE alimentando cargas trifásicas, quanto alimentando cargas monofásicas.

No capítulo 6 deste trabalho são traçadas curvas relacionando o valor da capacitância mínima em função das impedâncias de carga (considerando o GI operando a 750 rpm).

Ainda no capítulo 6, foram apresentados os principais resultados obtidos. Inicialmente foram apresentados os resultados para o GITAE alimentando cargas trifásicas dos tipos resistiva e RL (equilibrada e desequilibrada). Os resultados para a alimentação de uma carga RL desequilibrada são apresentados e comparados ao longo do capítulo citado, considerando as três configurações analisadas (ver Tabela 6.2).

Também foram analisadas e comparadas algumas configurações monofásicas, considerando a alimentação de uma carga do tipo RL. Estipulando valores apropriados para a carga e para a capacitância de excitação apresentadas pela Figura 6.28, pode-se verificar a concordância entre os resultados obtidos (previamente esperada) e apresentados na Tabela 6.3. Também foram comparadas duas configurações monofásicas comumente apresentadas em artigos: Steinmetz I e Steinmetz II.

Por fim, é importante destacar que o programa elaborado e a modelagem apresentada para o GI, banco de capacitores e carga, permite simular situações de acoplamento ou desacoplamento de capacitores e cargas, bem como variações de velocidades impostas ao GI (para isso são necessárias algumas mudanças no código-fonte do programa). Ainda, tal programa permite simular configurações monofásicas, estipulando valores altos de impedância para caracterizar circuito-aberto e baixos para caracterizar curto-circuito. No entanto, ao realizar tal procedimento, o passo de tempo necessário para a convergência do sistema diminui consideravelmente, aumentando, assim, o tempo de simulação.

7.2 Propostas de continuidade

Os seguintes tópicos são propostos para a continuidade deste trabalho:

- Analisar o GITAE, considerando um torque constante imposto ao eixo do gerador;
- Analisar o GITAE considerando a operação dentro de uma faixa de velocidade fixada;
- Propor um modelo para o GI de tal forma que possam ser consideradas as perdas ferromagnéticas, e também se possível, as perdas mecânicas, e ainda, realizar análises quantitativas das potências de entrada e saída do sistema, bem como do FP;
- Analisar um número maior de configurações monofásicas e compará-las sob as mais diversas condições (variação de cargas, banco de capacitores e velocidade imposta ao GI);
- Comparar a o desempenho de geradores de indução monofásicos e trifásicos, quando alimentando cargas monofásicas;
- Implementar experimentalmente algumas configurações, considerando um GITAE alimentando cargas trifásicas e monofásicas dos mais diversos tipos;

- Propor estratégias para controle das capacitâncias dos capacitores e controle da velocidade do gerador, em função das cargas acopladas ao gerador;
- Analisar o GITAE através da modelagem da máquina de indução pelo método de elementos finitos, realizando o acoplamento com as equações circuitais referentes ao banco de capacitores e carga.

ANEXO A1

Dados de Placa, Parâmetros e Curva de Magnetização da Máquina de Indução Simulada

Dados de Placa

Tensão nominal:	230 V / 400 V
Corrente nominal:	23,8 A / 13,7 A
Potência:	5,5 kW
Frequência:	50 Hz
Número de pólos:	8
Rotação nominal:	690 rpm
Momento de inércia:	0,230 kg·m ²

Parâmetros

Indutância de dispersão por fase do estator:	8,9382 mH
Indutância de dispersão por fase do rotor, referida ao estator:	4,8913 mH
Indutância de magnetização não saturada ¹ :	120 mH
Resistência por fase do estator:	1,07131 Ω
Resistência por fase do rotor, referida ao estator:	1,29511 Ω

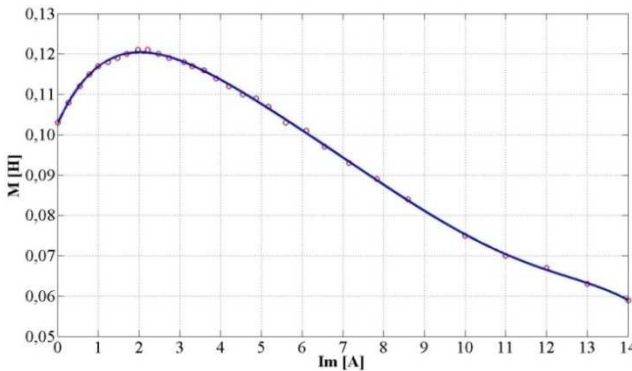


Figura A1.1 – M em função de I_m (aproximação por um polinômio de grau 6).

$$M(I_m) = -8,428 \cdot 10^{-8} \cdot I_m^6 + 4,123 \cdot 10^{-6} \cdot I_m^5 - 8,499 \cdot 10^{-5} \cdot I_m^4 + 9,808 \cdot 10^{-4} \cdot I_m^3 + \\ -6,664 \cdot 10^{-3} \cdot I_m^2 + 1,773 \cdot 10^{-2} \cdot I_m + 0,104$$

¹ Valor fixado e igual ao máximo valor M (ver figura A1.1).

ANEXO A2

Teoria dos Eixos de Referência

Na análise de máquinas assíncronas e síncronas, uma mudança conveniente de variáveis pode ser empregada para facilitar o tratamento do problema. Tal mudança se torna conveniente, devido ao fato das equações de tensão para estas máquinas envolverem indutâncias que são funções da posição ou da velocidade.

A2.1 Equações de transformação: mudança de variáveis

Uma transformação de variáveis trifásicas de um circuito estacionário para um novo sistema de referência arbitrário pode ser representada pela equação (A2.1) [21]:

$$\underline{f}_{qdo_s} = [K_s] \underline{f}_{abc_s} \quad (\text{A2.1}),$$

onde:

$$\underline{f}_{qdo_s}^T = \begin{bmatrix} f_{qs} & f_{ds} & f_{os} \end{bmatrix} \quad (\text{A2.2}),$$

$$\underline{f}_{abc_s}^T = \begin{bmatrix} f_{as} & f_{bs} & f_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{A2.3}),$$

$$[K_s] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A2.4}),$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (\text{A2.5}).$$

Na equação (A2.5), ξ representa uma variável de integração. A transformação inversa de (A2.1) também é válida, devendo-se para este caso obter a matriz inversa de $[K_s]$.

Nas equações apresentadas, f representa tensões ou correntes ou enlaces de fluxo, ou ainda, cargas elétricas. O sobrescrito T denota a

transposta da matriz. Já o subscrito s indica variáveis, parâmetros e transformações associadas aos circuitos estacionários.

As equações da transformação podem ser vistas como se as variáveis f_{ds} e f_{qs} fossem variáveis direcionadas segundo eixos ortogonais entre si e rodando a uma velocidade ω (ver Figura A2.1).

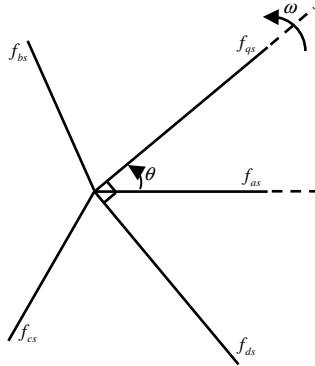


Figura A2.1 – Transformação de variáveis representada por relações trigonométricas.

Esta transformação é particularmente conveniente para ser aplicada às máquinas de corrente alternada, onde as direções de f_{as} , f_{bs} e f_{cs} podem ser vistas como as direções dos eixos magnéticos dos enrolamentos do estator [21].

A2.2 Equações de transformação para circuitos do rotor

No item anterior o conceito de eixo de referência arbitrário foi introduzido e aplicado a circuitos estacionários. No caso do motor de indução é também desejável transformar as variáveis associadas aos enrolamentos do rotor ao eixo de referência arbitrário. Desta forma, uma mudança de variáveis dos circuitos do rotor para a referência arbitrária pode ser expressa por [21]:

$$\underline{f}_{qdo_r} = [K_r] \underline{f}'_{abc_r} \quad (\text{A2.6}),$$

onde:

$$\underline{f}_{qdo_r}'^T = \begin{bmatrix} f_{qr}' & f_{dr}' & f_{or}' \end{bmatrix} \quad (\text{A2.7}),$$

$$\underline{f}_{abc_r}'^T = \begin{bmatrix} f_{ar}' & f_{br}' & f_{cr}' \end{bmatrix} \quad (\text{A2.8}),$$

$$[K_r] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos\beta & \cos(\beta - 2\pi/3) & \cos(\beta + 2\pi/3) \\ \sin\beta & \sin(\beta - 2\pi/3) & \sin(\beta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (\text{A2.9}),$$

$$\beta = \theta - \theta_r \quad (\text{A2.10}).$$

O ângulo θ é o definido pela equação (A2.5) e θ_r é definido por:

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(\xi) d\xi + \theta_r(0) \quad (\text{A2.11}).$$

Na equação (A2.11), ξ representa uma variável de integração. A transformação inversa de (A2.6) também é válida, devendo-se para este caso obter a matriz inversa de $[K_r]$.

O subscrito r indica variáveis, parâmetros e transformações associadas com circuitos rotativos.

É perceptível que a transformação apresentada neste item é análoga àquela apresentada no item A2.1, com β em substituição a θ . Ainda, a Figura A2.2 ilustra a transformação apresentada neste item.

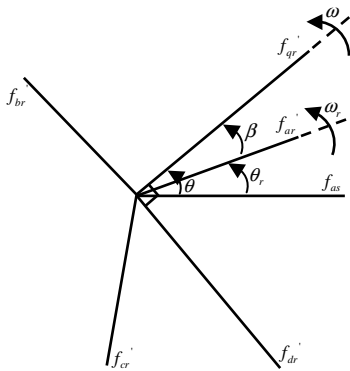


Figura A2.2 – Transformação de variáveis para circuitos rotativos representada por relações trigonométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAN, T. F. Performance analysis of a three-phase induction generator self-excited with a single capacitance. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, n. 4, p. 894-900, December 1999.
- [2] NESBA, A.; RACHID, I.; TOUHAMI, O. Dynamic performances of self-excited induction generator feeding different static loads. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 3, n. 1, p. 63-76, June 2006.
- [3] WANG, L.; DENG, R. Transient performance of an isolated induction generator under unbalanced excitation capacitors. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, n. 4, p. 887-893, December 1999.
- [4] JAIN, S. K.; SHARMA, J. D.; SINGH, S. P. Transient performance of three-phase self-excited induction generator during balanced and unbalanced faults. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 149, n. 1, pg. 50-57, January 2002.
- [5] MURTHY, S. S.; SINGH, B.; GUPTA, S. et al. General steady-state analysis of three-phase self-excited induction generator feeding three-phase unbalanced load/single-phase load for stand-alone applications. *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, n. 1, p. 49-55, January 2003.
- [6] IDJDARENE, K.; REKIOUA, D.; REKIOUA, T. et al. An approach for the modeling of an autonomous induction generator taking into account the saturation effect. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 4, n. 1, article 1052, 2005.
- [7] ELHAFYANI, M. L.; ZOUGGAR, S.; BENKADDOUR, M. et al. Permanent and dynamic behaviours of self-excited induction generator in balanced mode. *M. J. Condensed Matter*, vol. 7, n. 1, p. 49-53, January 2006.

- [8] SEYOUM, D; GRANTHAM, C; RAHMAN M. F. The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, n. 4, p. 936-944, July/August 2003.
- [9] WANG, L.; KUO, S.; Steady state performance of a self-excited induction generator under unbalanced load. *Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE*, vol. 2, p. 408-412, 2002.
- [10] CHATURVEDI, Y.; SANDHU, K. S. Analysis of self-excited induction generator under unbalanced operation. *Proceedings of International Conference on Energy and Environment*, p. 514-517, March 19-24, 2009.
- [11] AL-BAHRANI, A. H.; MALIK, N. H. Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, n. 4, p. 725-732, December 1990.
- [12] FUKAMI, T.; KABURAKI, Y.; KAWAHARA, S. et al. Performance analysis of a self-regulated self-excited single-phase induction generator using a three-phase machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, n. 3, September 1999.
- [13] SHILPAKAR, L. B.; SINGH, B. Dynamic behavior of a three-phase self-excited induction generator for a single-phase power generation. *Electric Power Systems Research*, vol. 48, n. 1, p. 37-44, 1998.
- [14] CHAN, T. F.; LAI, L. L. A novel single-phase self-regulated self-excited induction generator using a three-phase machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, n. 2, p. 204-208, June 2001.
- [15] MAHATO, S. N.; SHARMA, M. P.; SINGH, S. P. Transient performance of a single-phase self-regulated self-excited induction generator using a three-phase machine. *Electric Power Systems Research*, vol. 77, p. 839-850, 2007.

- [16] CHAN, T. F. Capacitance requirements of self-excited induction generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 8, n. 2, p. 304-311, June 1993.
- [17] WANG, L; LEE, C. A novel analysis on the performance of an isolated self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, n. 2, p. 109-117, June 1997.
- [18] CHAKRABORTY, C.; BHADRA, S. N.; CHATTOPADHYAY, A. K. Excitation requirements for stand alone three-phase induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, n. 4, p. 358-365, December 1998.
- [19] CHAN, T. F.; LAI, L. L. Capacitance Requirements of a three-phase induction generator self-excited with a single capacitance and supplying a single-phase load. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 17, n. 1, p. 90-94, March 2002.
- [20] MAHATO, S. N.; SINGH, S. P.; SHARMA, M. P. Excitation capacitance required for a self excited single phase induction generator using three phase machine. *Energy Conversion and Management*, vol. 49, p. 1126-1133, 2008.
- [21] KRAUSE, P. C.; WASYNICZUK, O. SUDHOFF, S. D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. 2. ed. IEEE Press Series on Power Engineering, 2002.
- [22] ALMEIDA, K. C. Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia B. *Apostila de Aula Prática*, UFSC.
- [23] AVOLIO, E. Laboratório L5 – Ensaio 2: determinação dos parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico. *Material de Aula Prática*, UNESP, Campus Bauru.
- [24] AL-BAHRANI, A. H.; MALIK, N. H. Steady state analysis and performance characteristics of a three-phase induction generator self excited with a single capacitor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, n. 4, p. 725-732, December 1990.

- [25] IDJDARENE, K.; REKIOUA, D.; REKIOUA, T. et al. Performance of an isolated induction generator under unbalanced loads. *IEEE Transactions on Energy Conversion: Accepted for future publication*, 2009.
- [26] TRAPP, J. G. *Gerador de Indução Isolado com Tensão e Frequência Reguladas por Conversor Matricial Esperso*. Santa Maria, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Maria.
- [27] HANCOCK, N. N. *Matrix Analysis of Electrical Machinery*. Pergamon Press Ltd. 1964.
- [28] BARBI, I. *Teoria Fundamental do Motor de Indução*. Editora da UFSC, Florianópolis, 1985.